

Г. К. ЖЕРВЕ

**ПРОМЫШЛЕННЫЕ  
ИСПЫТАНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
МАШИН**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ.

Г. К. ЖЕРВЕ

# ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В книге рассмотрены вопросы промышленных испытаний электрических машин в соответствии с действующими стандартами на электрические машины. Описаны испытания, общие для электрических машин всех видов, а также испытания, применяемые для каждого вида машин в отдельности.

Книга рассчитана на инженерно-технический персонал электромашиностроительных предприятий, электростанций и других электрохозяйств, эксплуатирующих электрические машины.

*Жерве Георгий Константинович*  
„ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН“

Редактор *Л. Б. Ривлин*

Технический редактор *Е. М. Соболева*

Сдано в производство 29/VI 1959 г.

Подписано к печати 15/X 1959 г.

М04661

Печ. л. 31,5.

Уч.-изд. л. 33.

Бум. л. 15,75.

Формат 60 × 92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Тираж 22000.

Зак. 336.

Цена 17 р. 50 к

2-я типография Военного издательства  
Министерства обороны Союза ССР  
Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей книге рассматриваются нормальные промышленные испытания электрических машин, т. е. такие испытания, которые должны проводиться согласно требованиям, предъявляемым соответствующими стандартами.

Период, прошедший со времени опубликования первого издания этой книги, ознаменовался выпуском значительного количества стандартов на электрические машины, из которых в первую очередь следует отметить основной стандарт — ГОСТ 183-55. Многие из этих стандартов содержат предписания в отношении испытаний охватываемых ими видов электрических машин; поэтому при подготовке настоящего издания была поставлена задача учесть все эти требования.

Хотя в книге рассматриваются промышленные испытания всех практически распространенных у нас видов электрических машин, главное внимание в ней обращено все же на их основные виды — машины постоянного тока общего назначения, синхронные машины (генераторы, двигатели и компенсаторы) и асинхронные бесколлекторные двигатели. При этом наибольшее место уделено испытаниям машин средних и крупных мощностей.

Обстановка, в которой протекают промышленные испытания, весьма разнообразна. Поэтому испытания, имеющие одну и ту же цель, в разных условиях приходится проводить различными методами. Учитывая это, в книге почти для каждого испытания предлагается не один метод, а два и более, но с тем, чтобы ни один из них не противоречил требованиям норм. Дело уже самого испытателя выбрать из них наиболее соответствующий условиям обстановки испытаний.

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность заслуженному деятелю науки и техники, доктору технических наук Р. А. Лютеру за ценные указания, сделанные им в процессе рецензирования рукописей обоих изданий, и инж. Л. Б. Ривлину за исключительное внимание при редактировании настоящего издания, а также многим читателям первого издания за ряд советов и пожеланий, учтенных при подготовке второго издания.

Ответы и замечания о настоящей работе просьба направлять по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1, Л. О. Госэнергоиздата.

*Автор*



## ОГЛАВЛЕНИЕ

### *Часть первая*

#### **Общие испытания**

|                                                                        | Стр. |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| 1-1. Стандарты и технические условия . . . . .                         | 7    |
| 1-2. Требования стандартов . . . . .                                   | 10   |
| 1-3. Виды промышленных испытаний . . . . .                             | 13   |
| 1-4. Измерение сопротивления изоляции . . . . .                        | 16   |
| 1-5. Измерение сопротивлений обмоток . . . . .                         | 20   |
| 1-6. Испытание при повышенной скорости вращения . . . . .              | 26   |
| 1-7. Испытание изоляции обмоток относительно корпуса . . . . .         | 28   |
| 1-8. Испытание междувитковой изоляции обмоток . . . . .                | 36   |
| 1-9. Испытание на нагревание . . . . .                                 | 37   |
| 1-10. Измерение температуры . . . . .                                  | 46   |
| 1-11. Температурные детекторы и индикаторы температуры . . . . .       | 59   |
| 1-12. Пределы допускаемых превышений температуры . . . . .             | 66   |
| 1-13. Коэффициент полезного действия . . . . .                         | 70   |
| 1-14. Измерение мощности . . . . .                                     | 77   |
| 1-15. Измерение вращающего момента . . . . .                           | 90   |
| 1-16. Измерение скорости вращения и скольжения . . . . .               | 98   |
| 1-17. Измерение расхода газов . . . . .                                | 105  |
| 1-18. Измерение расхода жидкостей . . . . .                            | 116  |
| 1-19. Измерение вибраций и биений . . . . .                            | 122  |
| 1-20. Измерение электрического напряжения между концами вала . . . . . | 127  |
| 1-21. Запись изменяющихся величин . . . . .                            | 130  |

### *Часть вторая*

#### **Испытание машин постоянного тока**

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2-1. Программы типовых и контрольных испытаний . . . . .                                              | 133 |
| 2-2. Проверка правильности соединений отдельных частей обмоток . . . . .                              | 135 |
| 2-3. Проверка правильности соединений целых обмоток . . . . .                                         | 139 |
| 2-4. Осмотр поверхности коллектора . . . . .                                                          | 151 |
| 2-5. Проверка правильности схемы обмотки якоря, отсутствия обрывов и замыканий в ней . . . . .        | 157 |
| 2-6. Установка щеток в нейтральное положение . . . . .                                                | 159 |
| 2-7. Особенности измерения сопротивлений обмоток . . . . .                                            | 162 |
| 2-8. Особенности испытания при повышенной скорости вращения . . . . .                                 | 182 |
| 2-9. Испытание междувитковой изоляции обмотки якоря . . . . .                                         | 183 |
| 2-10. Снятие характеристики холостого хода . . . . .                                                  | 186 |
| 2-11. Определение потерь холостого хода . . . . .                                                     | 192 |
| 2-12. Определение скорости вращения и другие испытания при холостом ходе в режиме двигателя . . . . . | 194 |
| 2-13. Короткое замыкание в режиме генератора . . . . .                                                | 198 |
| 2-14. Характеристика короткого замыкания . . . . .                                                    | 203 |
| 2-15. Снятие характеристик при нагрузке в режиме генератора . . . . .                                 | 206 |
| 2-16. Снятие характеристик при нагрузке в режиме двигателя . . . . .                                  | 213 |
| 2-17. Определение коэффициента полезного действия . . . . .                                           | 216 |

|                                                                           | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 2-18. Особенности определения отдельных потерь . . . . .                  | 221  |
| 2-19. Испытание на нагревание в режиме нагрузки . . . . .                 | 224  |
| 2-20. Испытание на нагревание косвенным методом . . . . .                 | 228  |
| 2-21. Оценка степени искрения . . . . .                                   | 231  |
| 2-22. Кратковременная перегрузка по току . . . . .                        | 233  |
| 2-23. Определение области безискровой коммутации . . . . .                | 236  |
| 2-24. Определение изменения данных для добавочных полюсов . . . . .       | 246  |
| 2-25. Тарирование машины постоянного тока . . . . .                       | 251  |
| 2-26. Особенности испытания сварочных генераторов . . . . .               | 254  |
| 2-27. Взаимная нагрузка машин постоянного тока . . . . .                  | 258  |
| 2-28. Устойчивость машин постоянного тока при совместной работе . . . . . | 267  |

### Часть третья

#### Испытание синхронных машин

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3-1. Программы типовых и контрольных испытаний . . . . .                                                             | 271 |
| 3-2. Испытание междувитковой изоляции обмотки якоря . . . . .                                                        | 273 |
| 3-3. Опыт холостого хода в режиме генератора . . . . .                                                               | 274 |
| 3-4. Проверка симметричности напряжений обмотки якоря . . . . .                                                      | 276 |
| 3-5. Опыт холостого хода в режиме двигателя . . . . .                                                                | 279 |
| 3-6. Короткое замыкание синхронного генератора . . . . .                                                             | 281 |
| 3-7. Опыт короткого замыкания в режиме генератора . . . . .                                                          | 283 |
| 3-8. Опыт короткого замыкания на выбеге . . . . .                                                                    | 289 |
| 3-9. Снятие нагрузочной характеристики . . . . .                                                                     | 290 |
| 3-10. Снятие V-образной характеристики . . . . .                                                                     | 293 |
| 3-11. Определение номинального тока возбуждения и номинального изменения напряжения . . . . .                        | 294 |
| 3-12. Определение коэффициента полезного действия . . . . .                                                          | 303 |
| 3-13. Определение потерь по методу самоторможения . . . . .                                                          | 306 |
| 3-14. Выполнение опытов самоторможения . . . . .                                                                     | 314 |
| 3-15. Испытание на нагревание непосредственной нагрузкой . . . . .                                                   | 320 |
| 3-16. Испытание на нагревание косвенным методом . . . . .                                                            | 324 |
| 3-17. Испытание на нагревание в режиме компенсатора . . . . .                                                        | 328 |
| 3-18. Определение утечки водорода . . . . .                                                                          | 330 |
| 3-19. Определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения . . . . .                                | 332 |
| 3-20. Классификация параметров синхронной машины . . . . .                                                           | 339 |
| 3-21. Снятие характеристик несимметричных коротких замыканий . . . . .                                               | 342 |
| 3-22. Определение синхронных реактивных сопротивлений . . . . .                                                      | 345 |
| 3-23. Определение активного и реактивного сопротивлений обратной последовательности . . . . .                        | 348 |
| 3-24. Определение реактивного сопротивления нулевой последовательности . . . . .                                     | 353 |
| 3-25. Опыт внезапного короткого замыкания . . . . .                                                                  | 359 |
| 3-26. Обработка осциллограммы внезапного короткого замыкания . . . . .                                               | 365 |
| 3-27. Опыт восстановления напряжения при отключении короткого замыкания . . . . .                                    | 380 |
| 3-28. Определение сверхпереходных реактивных сопротивлений при неподвижном роторе . . . . .                          | 384 |
| 3-29. Определение активного и реактивного сопротивлений обратной последовательности при неподвижном роторе . . . . . | 388 |
| 3-30. Определение реактивного сопротивления при удаленном индукторе . . . . .                                        | 390 |
| 3-31. Определение скорости нарастания напряжения и предельного напряжения возбудителя . . . . .                      | 393 |
| 3-32. Определение постоянных времени со стороны индуктора . . . . .                                                  | 397 |
| 3-33. Особенности испытания машин однофазного тока . . . . .                                                         | 402 |
| 3-34. Особенности испытания генераторов с самовозбуждением . . . . .                                                 | 404 |
| 3-35. Испытание крупных машин на месте установки . . . . .                                                           | 406 |

## Часть четвертая

## Испытание асинхронных машин

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4-1. Программы типовых и контрольных испытаний . . . . .                                                                  | 411 |
| 4-2. Особенности измерения сопротивлений обмоток . . . . .                                                                | 412 |
| 4-3. Определение коэффициента трансформации . . . . .                                                                     | 418 |
| 4-4. Особенности испытания междувитковой изоляции обмоток . . . . .                                                       | 421 |
| 4-5. Особенности испытания при повышенной скорости вращения . . . . .                                                     | 422 |
| 4-6. Опыт холостого хода . . . . .                                                                                        | 424 |
| 4-7. Опыт короткого замыкания . . . . .                                                                                   | 433 |
| 4-8. Проверка симметричности обмотки короткозамкнутого ротора . . . . .                                                   | 441 |
| 4-9. Опыт короткого замыкания при пониженной частоте . . . . .                                                            | 443 |
| 4-10. Испытание на нагревание в режиме непосредственной нагрузки . . . . .                                                | —   |
| 4-11. Снятие рабочих характеристик . . . . .                                                                              | 446 |
| 4-12. Построение круговых диаграмм . . . . .                                                                              | 452 |
| 4-13. Построение круговой диаграммы двигателя с фазовым ротором . . . . .                                                 | 457 |
| 4-14. Построение круговой диаграммы двигателя с короткозамкнутым ротором с простой клеткой . . . . .                      | 464 |
| 4-15. Построение круговой диаграммы двигателя с короткозамкнутым ротором с двойной клеткой или с глубоким пазом . . . . . | 465 |
| 4-16. Снятие зависимости вращающего момента от скорости вращения посредством торможения . . . . .                         | 470 |
| 4-17. Снятие зависимости вращающего момента от скорости вращения в процессе прямого пуска . . . . .                       | 475 |
| 4-18. Определение минимального вращающего момента в процессе пуска . . . . .                                              | 481 |
| 4-19. Особенности испытания серийных двигателей . . . . .                                                                 | 483 |
| 4-20. Испытание синхронных двигателей в качестве асинхронных . . . . .                                                    | 489 |
| 4-21. Особенности испытания двигателей однофазного тока . . . . .                                                         | 492 |

## ПРИЛОЖЕНИЯ

|                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| I. Испытательные напряжения при испытании электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками (извлечение из ГОСТ 183-55, п. 27) . . . . .                                              | 495 |
| II. Предельные допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре охлаждающей среды $+35^{\circ}\text{C}$ и высоте над уровнем моря не более 1000 м (извлечение из ГОСТ 183-55, п. 21) . . . . . | 497 |
| III. Таблица поправок в процентах для приведения сопротивления медной обмотки, измеренного при температуре $\vartheta$ , к температуре $+15^{\circ}\text{C}$ . . . . .                                                     | 499 |
| IV. Таблица поправок в процентах для приведения сопротивления алюминиевой обмотки, измеренного при температуре $\vartheta$ , к температуре $+15^{\circ}\text{C}$ . . . . .                                                 | 500 |
| V. Таблица поправок в процентах для приведения электродвижущих сил, измеренных при частоте $f$ , к частоте 50 гц . . . . .                                                                                                 | 501 |
| VI. Таблица значений $\cos \varphi$ в зависимости от отношения показаний ваттметров $\alpha_1: \alpha_2$ в схеме измерения мощности трехфазного тока по способу двух ваттметров при симметричной нагрузке фаз . . . . .    | 502 |
| VII. Таблица значений $\sin \varphi$ в зависимости от отношения показаний ваттметров $\alpha_1: \alpha_2$ в схеме измерения мощности трехфазного тока по способу двух ваттметров при симметричной нагрузке фаз . . . . .   | 503 |
| VIII. Таблица величин скольжения $s$ в процентах в зависимости от продолжительности $T[\text{сек}]$ отсчета 20 периодов тока ротора при частоте питания 50 гц . . . . .                                                    | 504 |

## ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

### ОБЩИЕ ИСПЫТАНИЯ

#### 1-1. Стандарты и технические условия

Чтобы электрическая машина могла считаться вполне доброкачественной, пригодной к эксплуатации, она должна удовлетворять ряду требований, предъявляемых к ней действующими стандартами. Кроме того, в ряде случаев к машине предъявляются дополнительные требования, оговариваемые техническими условиями.

Государственные общесоюзные стандарты выпускаются центральными органами стандартизации и обязательны для применения на всей территории Советского Союза для всех ведомств; кроме того, в виде временного мероприятия различными центральными органами выпускались в прошлом так называемые «ведомственные стандарты», обязательные для применения только внутри данного ведомства.

Основным стандартом в области электрических машин является ГОСТ 183-55 — «Машины электрические. Общие технические требования», распространяющийся на электрические машины постоянного тока с номинальной мощностью выше 50 вт и переменного тока при частоте 50 гц с номинальной мощностью выше 50 вт (или 50 ва).

Этот стандарт не распространяется на такие электрические машины, к которым вследствие особых условий их работы предъявляются требования, отличающиеся от установленных в нем, например машины, предназначенные для работы на высоте свыше 3000 м над уровнем моря или при температуре охлаждающей среды выше  $+45^{\circ}\text{C}$ , и ряд других.

ГОСТ 183-55 состоит из четырех частей:

- I. Технические требования.
- II. Методы испытаний.
- III. Маркировка.
- IV. Документы к машине.

Кроме того, в приложение к стандарту вынесены основные определения понятий, встречающихся в нем.

К отдельным видам машин могут предъявляться требования, не содержащиеся в этом стандарте, или требования, более жест-

кие, чем указанные в нем. Такие требования указываются в специализированных стандартах на эти виды машин.

Из числа специализированных стандартов в первую очередь следует отметить относящиеся к крупным синхронным машинам для энергетических систем:

ГОСТ 533-51 — «Генераторы электрические паротурбинные двухполюсные (турбогенераторы). Технические условия».

ГОСТ 5616-50 — «Генераторы электрические гидротурбинные (гидрогенераторы). Технические условия».

ГОСТ 609-54 — «Компенсаторы синхронные мощностью от 5000 до 30 000 *кв*а с воздушным охлаждением. Технические условия».

Эти стандарты предъявляют требования, специфические для охватываемых ими видов машин и потому отсутствующие в ГОСТ 183-55, а частично ужесточают требования этого последнего применительно к данным машинам.

Ряд стандартов посвящен асинхронным двигателям общего назначения:

ГОСТ 8212-56 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 10 до 600 *вт*. Технические условия».

ГОСТ 186-52 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 0,6 до 100 *квт*. Технические условия».

Значительное количество стандартов посвящено электрическим машинам специального назначения. Из них следует упомянуть:

ГОСТ 2582-50 — «Машины электрические постоянного тока тяговые. Технические условия».

ГОСТ 184-53 — «Электродвигатели постоянного тока крановые, подъемно-транспортные и металлургические».

ГОСТ 185-53 — «Электродвигатели трехфазного тока асинхронные крановые, подъемно-транспортные и металлургические».

ГОСТ 6661-53 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные с короткозамкнутым ротором, мощностью от 0,4 до 100 *квт*, рудничные взрывобезопасные. Технические условия».

ГОСТ 304-51 — «Генераторы постоянного тока для дуговой сварки. Технические условия».

ГОСТ 1651-54 — «Генераторы низковольтные многоамперные постоянного тока двухколлекторные».

ГОСТ 2167-43 — «Генераторы постоянного тока двухколлекторные для зарядки аккумуляторных батарей».

ГОСТ 2535-44 — «Генераторы постоянного тока однокolleкторные зарядно-буферные. Технические условия».

ГОСТ 2308-43 — «Турбогенераторы малой мощности транспортные».

Особо нужно упомянуть следующий стандарт:

ГОСТ 7217-54 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 0,6 до 1000 *квт*. Методы испытаний».

Этот стандарт является первым в области электрических машин, посвященным исключительно методам испытания электрических машин определенного вида. В дальнейшем предполагается выпуск подобных стандартов и для других видов электрических машин, а до тех пор в отношении машин всех видов, кроме асинхронных двигателей, приходится пользоваться лишь теми сравнительно ограниченными предписаниями по методам испытаний, которые помещены во II части ГОСТ 183-55; программы испытаний машин различных видов содержатся во многих из перечисленных выше стандартов.

Здесь не упомянуты стандарты на электрические машины, посвященные вопросам, не имеющим отношения к тем качествам или сторонам работы электрических машин, которые нуждаются в проверке посредством испытания, как, например, установочные и присоединительные размеры, шкалы номинальных мощностей, напряжений и т. п.

Как бы ни были многочисленны стандарты, они не могут всесторонне и во всех подробностях охватить все возможные виды электрических машин. В приведенном выше перечне стандартов можно различить две основные их категории: это либо стандарты на обширные группы машин общего или специального назначения, как турбо- и гидрогенераторы, асинхронные двигатели, тяговые машины и т. п., либо стандарты на очень узкие группы или даже отдельные типы машин совершенно специального назначения, однако выпускаемые промышленностью в больших количествах, как, например, специализированные генераторы постоянного тока различных видов и некоторые другие.

Но помимо этого существует множество видов машин, не имеющих столь обширного применения, которые должны отличаться определенными свойствами, не предусмотренными во всех этих стандартах. Кроме того, предметом стандартизации могут являться только изделия, по которым имеется достаточный накопленный опыт и установились определенные требования; этому не могут отвечать всякие новые виды изделий. Наконец, просто нет возможности подвергать стандартизации единичные изделия, которые иной раз должны удовлетворять совершенно специальным требованиям, не повторяющимся в других изделиях.

Во всех таких случаях требуемые свойства изделий должны определяться техническими условиями, устанавливаемыми либо для определенной весьма узкой группы изделий, либо даже для определенного заказа. Технические условия могут касаться самых различных свойств или конструктивных особенностей определяемых ими изделий — как охваченных, так и не охваченных стандартами; но предъявляемые ими дополнительные требования не должны идти в разрез с требованиями общих

стандартов или стандартов на машины данного вида, или снижать эти требования.

Как правило, технические условия, оговаривая специфические требования к изделию, во всех остальных отношениях относят его к одному из существующих стандартов, главным образом, к общему стандарту ГОСТ 183-55.

## 1-2. Требования стандартов

Требования, предъявляемые стандартами, вырабатываются на основе многолетних наблюдений и опыта эксплуатации большого количества готовых изделий; они охватывают разнообразие их свойства и режимы работы и ставят своей задачей поддержание качества выпускаемой продукции на определенном уровне и нормализацию таких элементов и свойств изделий, которые влияют тем или иным образом на работу или конструкцию связанных с этими изделиями смежных устройств. Кроме того, предметом особого внимания стандартов является взаимозаменяемость, определяемая как конструктивными размерами, так и чисто электромеханическими свойствами изделий.

Как уже было отмечено в § 1-1, ряд стандартов на электрические машины посвящен требованиям, не имеющим отношения к теме данной книги. Поэтому ниже рассматриваются только основные из тех требований, проверка удовлетворения которым может и должна являться целью промышленных испытаний электрических машин.

1. Требования в отношении нагревания электрических машин являются безусловно самыми важными из всех предписаний; они указывают те предельные значения температуры, до которых могут нагреваться различные части электрических машин, в частности их изолированные обмотки, без появления таких изменений изоляции, которые могут сократить нормальный срок службы машины. Изоляция, температура которой ни в одной точке никогда не превосходит установленных пределов, может служить в течение практически приемлемого срока службы машины, обычно не менее 15—20 лет.

2. Требования к электрической прочности изоляции обмоток по отношению к корпусу и отдельных витков по отношению друг к другу указывают те выработанные практикой запасы электрической прочности изоляции, которые обеспечивают надежную работу машины при условии, что не нарушаются требования в отношении нагревания.

Следует отметить, что, уступая сложности и стесненности конструкции электрических машин, требования к электрической прочности их изоляции значительно ниже, чем аналогичные требования, предъявляемые к изоляции аппаратуры, кабелей, проходных и опорных изоляторов и т. п., в том числе и трансформа-

торов; таким образом, всегда необходимо иметь в виду, что в отношении прочности изоляции электрическая машина представляет наиболее уязвимое место в той системе, в которой она работает. Отсюда следует, что отступления от требований к электрической прочности изоляции в машинах безусловно не должны допускаться.

3. Требования к механической прочности вращающихся частей машины определяются соображениями безопасности как самой машины и окружающего оборудования, так и, в особенности, обслуживающего персонала, в случаях ненормального повышения скорости вращения машины. В зависимости от вида машины требования эти тем выше, чем больше ненормальные повышения скорости, возможные в процессе ее эксплуатации.

Кроме основных требований, распространяющихся на все виды машины, существуют требования, касающиеся только какого-нибудь определенного вида машин, как, например, перечисленные ниже.

4. Требования к экономическим показателям (коэффициент полезного действия, коэффициент мощности) существуют для турбогенераторов, асинхронных двигателей, сварочных генераторов и некоторых других видов машин. Этими требованиями устанавливаются наименьшие значения показателей, которые могут иметь такие машины при номинальном режиме работы в зависимости от номинальной мощности и других номинальных данных машины.

5. Требования к эксплуатационным показателям (отношение начального пускового и наибольшего вращающих моментов к номинальному, отношение начального пускового тока к номинальному, скорость нарастания напряжения и т. п.) существуют для электрических машин различных видов. Предписываемые ими значения определяются соображениями устойчивости работы машины, условиями пуска, поведением машины в аварийных случаях и т. д.

6. Требования к работе щеточного аппарата машин постоянного тока и коллекторных машин переменного тока имеют целью обеспечение эксплуатационной надежности этих машин путем установления предельно допустимой степени искрения щеток, не препятствующей нормальной работе машины в соответствии с ее назначением.

7. Требования к выносливости при кратковременных перегрузках. Хотя эти требования и носят общий характер, но по отношению к каждому виду машин выливаются в специфическую форму; так, например, для машин постоянного тока они по существу сводятся к установлению необходимого запаса надежности работы щеточного аппарата. Сюда же могут быть отнесены требования к синхронным маши-



нам в отношении механической прочности при внезапных коротких замыканиях.

8. Требования в отношении вибрации. Общих требований в отношении вибрации электрических машин не существует; предельные допустимые величины вибраций устанавливаются стандартами на некоторые отдельные виды машин (турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы).

9. Требования в отношении длительной или кратковременной работы в ненормальных условиях предъявляются главным образом стандартами на отдельные виды машин и большей частью относятся к их работе при ненормальном напряжении, а для машин переменного тока — еще и при ненормальной частоте, а также (для трехфазного тока) при несимметрии нагрузок фаз.

10. Требования в отношении шумов и промышленных радиопомех, создаваемых электрическими машинами, относятся главным образом к машинам постоянного тока, поскольку основным источником радиопомех в электрических машинах является работа щеточного аппарата. Строгость этих требований определяется назначением машины и устанавливается техническими условиями. Проверка удовлетворения им составляет специфическую область акустических и радиотехнических измерений и в дальнейшем не рассматривается.

Вследствие естественных производственных и технологических отклонений различные машины одного и того же типа, выполненные по одним и тем же данным, по своим экономическим и эксплуатационным показателям имеют некоторый разброс, нормально тем меньший, чем выше культура производства на данном предприятии.

По этой причине ГОСТ 183-55, п. 30, устанавливает предельные допускаемые отклонения на ряд показателей; машина считается удовлетворяющей стандарту, если ни один из ее нормированных показателей не выходит из пределов этих отклонений.

Допускаемые отклонения распространяются на величины, нормированные как ГОСТ 183-55, так и другими стандартами и техническими условиями на отдельные виды электрических машин, если только ими не установлены более высокие требования к допускаемым отклонениям.

Особо специфическими являются требования, предъявляемые некоторыми стандартами в отношении класса точности измерительных приборов, применяемых при испытаниях.

Понятно, что высокий класс точности измерительных приборов не вредит при проведении испытаний; однако приборы высоких классов точности дороги и требуют более осторожного обращения, чем приборы низких классов точности, и восстановление высокого класса точности при ремонте более затруднительно. Поэтому нерационально применять такие приборы

там, где это не оправдано действительной необходимостью. В этом вопросе нет полной согласованности между различными стандартами. Наиболее определенные предписания дает ГОСТ 7217-54, п. 1, согласно которому все электрические измерения должны производиться приборами классов 0,2 или 0,5, и лишь для трехфазных ваттметров допускается понижение класса точности до 1,0.

Следует, однако, отметить, что ни в одном из стандартов, перечисленных в § 1-1, нет указаний о классе точности неэлектрических измерительных приборов; между тем применение наиболее точных электроизмерительных приборов не дает должного результата, если наряду с ними применяются неэлектрические измерительные приборы более низких классов точности, например тахометры, динамометры и т. д., от правильности показаний которых может зависеть окончательный результат испытания.

До настоящего времени нет единой системы, которая позволяла бы сопоставлять точность разнородных измерительных приборов. Поэтому при выборе класса электроизмерительных приборов следует учитывать в каждом отдельном случае возможность влияния на результаты измерения недостаточной точности применяемых неэлектрических измерительных приборов.

В общем при типовых испытаниях по возможности должны применяться приборы класса 0,2 с допустимым понижением до 0,5, а при контрольных — приборы класса 0,5 с допустимым понижением до 1,0, если нет прямых указаний на необходимый класс точности.

Для того чтобы применение приборов высокого класса точности оправдывало себя, необходимо выбирать пределы измерений применяемых приборов так, чтобы их показания находились в определенных границах; в этом отношении тот же ГОСТ 7217-54 дает указание, что измеряемые значения должны находиться в пределах от 20 до 95% шкалы, что, впрочем, не может быть распространено на однофазные ваттметры при измерении мощности трехфазного тока по способу двух ваттметров.

### 1-3. Виды промышленных испытаний

ГОСТ 183-55 предусматривает два вида промышленных испытаний электрических машин: типовые и контрольные.

Согласно определению этого стандарта (приложение, п. 36) «типовыми испытаниями электрических машин называются испытания электрических машин, отобранных от серийных партий с целью проверки всех требований, предъявляемых к электрическим машинам, указанных в настоящем стандарте, и, кроме того, в стандартах на отдельные виды машин, а при отсутствии стандартов — в технических условиях на эти машины. Сроки проведения типовых испытаний и количество машин, отбираемых для этих испытаний, устанавливаются (если необхо-

димо) в стандартах на отдельные виды машин, а при отсутствии стандартов — в технических условиях на эти машины».

В соответствии с этим программы типовых испытаний машин основных видов — генераторов и двигателей постоянного тока, синхронных генераторов, двигателей и компенсаторов и асинхронных двигателей — установлены с таким расчетом, чтобы была возможна проверка всех технических требований, предъявляемых стандартом.

Само собой разумеется, что типовым испытаниям должны подвергаться в первую очередь все главные образцы выпускаемых машин, т. е. первые экземпляры, выполненные в точности по тем данным и по той технологии, по которым будут выпускаться машины данного типа. Типовое испытание должно повторяться при всяких изменениях, вносимых в расчетные данные, конструкцию или технологию изготовления машины, если эти изменения могут повлиять на ее свойства.

Кроме того, проведение типовых испытаний целесообразно в случае обнаружения повторяющихся отклонений результатов контрольных испытаний машин данного типа от результатов ранее проведенных типовых испытаний, как средство установления причин таких отклонений.

На заводах крупного электромашиностроения зачастую едва ли не большинство выпускаемых машин являются машинами новых типов; вне зависимости от того, предполагается ли в дальнейшем изготовление машин данного типа, каждая такая машина должна подвергаться типовому испытанию. Нередко бывает, что однажды выпущенный тип машины повторяется через более или менее значительный промежуток времени, иногда измеряемый несколькими годами; если даже в него формально не внесено никаких изменений, можно все же рекомендовать в таких случаях повторение типовых испытаний, так как состояние технологии производства, качество материалов и полуфабрикатов за этот промежуток времени могли измениться в такой степени, что это отразится и на свойствах машины.

Следует отметить, что при выпуске некоторых стандартов вместо термина «типовые испытания» был применен термин «периодические испытания».

Согласно определению ГОСТ 183-55 (приложение, п. 37) «контрольными испытаниями электрических машин называются испытания, которым подвергается каждая электрическая машина, выпускаемая заводом-поставщиком».

Программы контрольных испытаний являются значительно сокращенными по сравнению с программами типовых испытаний. Это сокращение произведено с таким расчетом, чтобы была обеспечена возможность проверки главнейших технических требований как непосредственно, так и путем сравнения с результатами типовых испытаний машин данного типа, проведенных ранее.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 32, в случае невозможности проведения каких-либо из типовых и даже из контрольных испытаний на заводе-поставщике, допускается проведение их на месте установки машины у заказчика.

Некоторые стандарты на крупные машины, такие, как турбогенераторы (ГОСТ 533-51), гидрогенераторы (ГОСТ 5616-50) и синхронные компенсаторы (ГОСТ 609-54), предусматривают еще один вид испытаний — приемосдаточные испытания, проводимые по окончании монтажа на месте установки по программам, указанным в этих стандартах, на предмет установления соответствия требованиям каждого данного стандарта.

По объему эти испытания занимают промежуточное положение между типовыми и контрольными испытаниями по ГОСТ 183-55 с добавлением некоторых испытаний, выполнение которых на заводе-поставщике либо невозможно, либо не дает результатов, характерных для машины после ее установки у заказчика.

В процессе эксплуатации электрических машин в определенные сроки, например один раз в год, проводятся эксплуатационные испытания, целью которых является проверка исправности машин.

Кроме этих видов нормальных промышленных испытаний, могут производиться еще специальные и исследовательские испытания.

Специальные испытания проводятся дополнительно к типовым или контрольным испытаниям по специальной программе и имеют целью установление соответствия машины особым требованиям, определяемым техническими условиями и выходящим из пределов требований стандартов.

Исследовательские испытания проводятся над машиной или группой машин данного типа, данной серии или данного вида по особой программе, разработанной для данного случая. Цели этих испытаний могут быть самыми различными; наиболее характерными из них являются:

- а) получение исходных данных для проектирования новых типов или технического усовершенствования существующих;
- б) установление возможности экономии применяемых материалов и замены их другими материалами;
- в) разработка новых методов расчета и уточнение существующих;
- г) исследование новых схем и сочетаний машин как друг с другом, так и с иными механизмами и т. д.

Специальные и исследовательские испытания могут в значительной части состоять из тех же опытов, которые входят в программы типовых испытаний; однако нередко в них включаются и особые опыты, рассмотрение которых выходит из пределов данной книги.

Равным образом здесь не рассматриваются такие испытания, которые ставят целью демонстрацию различных свойств электрических машин в учебных целях.

#### 1-4. Измерение сопротивления изоляции

Первым пунктом программы испытания машин всех видов является измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками.

Согласно требованиям ГОСТ 183-55, п. 29, это сопротивление в мегомах должно быть не ниже, чем вычисленное по формуле

$$r = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}} [\text{Мом}],$$

где  $U$  — номинальное напряжение данной обмотки в вольтах, а  $P$  — номинальная мощность машины в киловольтамперах.

**Пример.** Турбогенератор мощностью 25 000 квт при  $\cos \varphi = 0,8$  имеет номинальное напряжение  $U_c = 6300$  в и номинальное напряжение возбуждения  $U_p = 230$  в. Требуется определить наименьшее допустимое значение сопротивления изоляции обмоток статора и ротора.

Номинальная мощность машины в киловольтамперах равна

$$P = \frac{25000}{0,8} = 31250 \text{ ква.}$$

Применение приведенной выше формулы к обмотке статора дает:

$$r_c = \frac{6300}{1000 + 0,01 \cdot 31250} = 4,8 \text{ Мом};$$

для ротора же она дает:

$$r_p = \frac{230}{1000 + 0,01 \cdot 31250} = 0,175 \text{ Мом.}$$

Стандарт не указывает, как должно производиться измерение сопротивления изоляции, в частности, как понимать его требование в применении к обмоткам многофазного тока, имеющим выводы начал и концов всех фаз: должна ли вся обмотка иметь это сопротивление изоляции, или его надлежит требовать от каждой фазы в отдельности.

Действительно, при измерении сопротивления изоляции всей обмотки по отношению к корпусу сопротивления изоляции отдельных фаз оказываются включенными параллельно друг другу.

Если обозначить через  $r_1, r_2, r_3 \dots$  и т. д. сопротивления изоляции отдельных фаз, то сопротивление изоляции всей обмотки будет:

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_m}}.$$

В случае, если  $r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_m$ ,

$$r = \frac{r_m}{m},$$

где  $m$  есть число фаз.

Ответ на поставленный вопрос может быть получен косвенным образом, по аналогии с требованиями стандарта в отношении испытания изоляции обмоток относительно корпуса машины, согласно которым этому испытанию подвергают поочередно каждую электрически независимую цепь. При наличии выводов начала и конца каждой фазы последняя рассматривается как электрически независимая цепь; если же соединение фаз произведено внутри машины наглухо, то вся обмотка в целом считается за одну цепь (ГОСТ 183-55, п. 58).

Если обмотка подразделена на части, имеющие самостоятельные выводы начал и концов для возможности переключения на различные напряжения, то измерение сопротивления изоляции должно производиться из расчета на наибольшее из этих напряжений для всей обмотки в целом, что, однако, не препятствует измерению сопротивления изоляции частей по отношению друг к другу, как, например, в машинах постоянного тока с двумя отдельными якорными обмотками, выведенными к разным коллекторам.

Цепи последовательного и параллельного (или независимого) питания в машинах постоянного тока рассматриваются как электрически независимые.

Стандарт не дает указания о том, какую температуру должна иметь обмотка при измерении сопротивления изоляции. Между тем известно, что сопротивление даже хорошо высушенной изоляции понижается по мере повышения ее температуры; следовательно, при измерении сопротивления изоляции в холодном состоянии нужно учитывать, что по мере повышения температуры величина его будет понижаться.

Заводы-поставщики обычно предъявляют внутризаводскими нормами значительно более жесткие требования к наименьшим допустимым значениям сопротивления изоляции в холодном состоянии, чем получающиеся по вышеуказанной формуле.

Инструментом для измерения сопротивления изоляции нормально является мегомметр; напряжение его источника постоянного тока обычно составляет 500 в, что достаточно для измерения сопротивлений до 100 Мом; если же требуется измерять более высокие сопротивления, то приходится применять мегомметры с повышенными напряжениями, однако следя за тем, чтобы последние не превосходили тех значений, которые являются испытательными для данных обмоток при испытании электрической прочности их изоляции относительно корпуса.

Зажим мегомметра, предназначенный для соединения с землей, подключается к корпусу машины, а противоположный соединяется поочередно с выводами всех обмоток, сопротивление изоляции которых подлежит измерению. Если требуется измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению друг к другу, это может быть совмещено с измерением сопротивления изоляции относительно корпуса машины, если соединять с последним зажимы всех обмоток, кроме той, на которой производится измерение; но можно производить это измерение и непосредственно, соединяя оба зажима мегомметра с двумя различными обмотками.

Очень низкие сопротивления изоляции — до сотен тысяч омв включительно — могут измеряться посредством омметров, мостов и т. д.; при пользовании этими приборами следует производить каждое измерение дважды, изменяя направление тока через изоляцию. Если оба измерения дают одинаковые результаты, это свидетельствует о том, что в изоляции практически не содержится влаги; ее присутствие создает между медью обмотки и сталью сердечника э. д. с., под влиянием которой такие два измерения дают различные результаты.

Измерение сопротивления изоляции обмоток крупных машин высокого напряжения представляет большое затруднение по той причине, что емкость таких обмоток относительно корпуса очень велика; для того чтобы зарядить ее до потенциала, равного напряжению источника мегомметра, требуется продолжительное вращение последнего, что очень утомительно. В таких случаях с успехом применяются мегомметры с моторным приводом или с выпрямительными устройствами, питаемыми от сети переменного тока; подобное измерение может считаться законченным только тогда, когда показания мегомметра совершенно перестанут изменяться, на что иногда требуется несколько минут.

По окончании измерения сопротивления изоляции подобных обмоток необходимо отводить накопленные ими заряды в землю, так как в противном случае они, сохраняясь очень продолжительное время, могут служить причиной поражения персонала при прикосновении к выводам этих обмоток; для этого обмотка соединяется с корпусом машины на время не менее 2 мин.

Продолжительность установления показаний мегомметра тем больше, чем меньше при прочих равных условиях содержание влаги в изоляции обмотки. Последнее обстоятельство положено в основу суждения о степени влажности изоляции по так называемому методу абсорбции на основании определения скорости установления показаний мегомметра при его непрерывном равномерном вращении.

Согласно правилам, установленным Министерством электростанций СССР, эта скорость условно определяется отношением

двух показаний мегомметра:  $r_{15}$  по истечении 15 сек после начала вращения и  $r_{60}$  по истечении 60 сек. Изоляция считается практически достаточно сухой, если соблюдено неравенство

$$k = \frac{r_{60}}{r_{15}} \geq 1,3.$$

Величина  $k$  носит название коэффициента абсорбции.

Помимо сопротивления изоляции обмоток, подлежит измерению сопротивление изоляции подшипников, применяемой в крупных машинах и многоточасных агрегатах для предотвращения подшипниковых токов.

Поскольку обычно, по крайней мере, один из подшипников машины или агрегата остается неизолированным, для измерения сопротивления изоляции изолированных подшипников приходится вводить на время измерения между валом и вкладышами всех неизолированных подшипников сухую изолирующую прокладку.

В крупных быстроходных машинах, как, например, в турбогенераторах, для возможности непрерывного контроля сопротивления изоляции изолированного подшипника под него подкладывается металлический промежуточный лист, двухсторонне изолированный — от фундаментной плиты и от подшипника. Кроме того, во все маслопроводы врезаются также двухсторонне изолированные вставки. Тогда проверка изоляции подшипника сводится к измерению сопротивления изоляции промежуточного листа и вставок относительно корпуса машины. Это, однако, не дает полной гарантии исправности изоляции подшипника, так как остается возможность замыкания его на один из фундаментных болтов в обход изоляции промежуточного листа, что всегда следует иметь в виду при выполнении измерения.

Изоляция подшипника во всех случаях считается достаточной, если ее сопротивление не меньше чем 1 Мом (см. ГОСТ 533-51, п. 23; ГОСТ 609-54, п. 18).

В гидрогенераторах с вертикальным валом подвешного<sup>1</sup> типа обычно изолируется ванна опорного подпятника и корпус верхнего направляющего подшипника, в гидрогенераторах же зонтичного типа только верхний направляющий подшипник, и то лишь при условии, что он находится выше ротора. Согласно ГОСТ 5616-50, п. 21, достаточной величиной сопротивления изоляции подпятника и верхнего направляющего подшипника считается 0,3 Мом.

<sup>1</sup> Гидрогенератор называется подвешным, если ротор расположен ниже опорного подпятника, и зонтичным, если ротор расположен выше опорного подпятника.



## 1-5. Измерение сопротивлений обмоток

Вторым пунктом программ типовых и контрольных испытаний машин всех видов является измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии. Согласно приложению к ГОСТ 183-55, п. 20, практически холодным состоянием электрической машины называется такое состояние, при котором температура любой ее части отличается от температуры охлаждающей среды не более чем на  $\pm 3^\circ \text{C}$ .

Так как от точности измерения сопротивлений обмоток в холодном состоянии зависит правильность определения ряда важнейших величин, на него должно быть обращено самое серьезное внимание.

Из всех существующих способов измерения сопротивления при промышленных испытаниях электрических машин могут находить применение только те, которые удовлетворяют следующим требованиям:

а) Достаточная точность измерения. Принятый способ должен обеспечивать погрешность измерения сопротивления обмотки, не превосходящую той величины, которая соответствует погрешности измерения ее температуры.

Если считать, что практически применяемые способы измерения температуры обеспечивают погрешность в  $\pm 1,0^\circ \text{C}$ , что соответствует изменению сопротивления обмотки в  $\pm 0,4\%$ , то последняя величина и должна считаться допустимой погрешностью измерения сопротивления при типовых испытаниях.

При контрольных испытаниях, к которым предъявляются менее высокие требования, допустимая погрешность измерения сопротивления может быть повышена до  $\pm 1 \div 2\%$ .

б) Быстрота производства измерения. Это требование выставляется не только с точки зрения общей экономии времени, затрачиваемого на испытания, но и потому, что в ряде случаев момент измерения должен быть отчетливо зафиксирован во времени, что невозможно, если измерение требует кропотливых операций.

в) Подвижность измерительного устройства. Так как измерения приходится производить в более или менее удаленных друг от друга местах, измерительное устройство должно допускать легкую переноску, после которой не требуется никакой его настройки или регулировки. Применение стационарных измерительных устройств, от которых протягиваются длинные проводники к тому или иному объекту измерения, имеет то неудобство, что удаляет наблюдателя от объекта, лишает его связи с ним и вносит дополнительные погрешности.

Способ обыкновенного моста, или моста Витстона, имеет тот недостаток, что при нем к измеренному сопротивлению прибавляется сопротивление соединительных про-

водников и, что еще хуже, их контактов; ГОСТ 7217-54, п. 4, за-  
прещает его применение для измерения сопротивлений менее  
1 ом.

Способ двойного моста, или моста Томсона, свободен от этого недостатка; но для того, чтобы получить от него наивысшую точность, нужно применять его с зеркальным гальванометром высокой чувствительности, требующим стационарной установки.

Быстрота измерений при мостовых способах зависит от конструкции аппаратуры; но, как общее правило, можно утверждать, что чем большую быстроту допускает конструкция моста, тем меньшую точность и надежность измерения она обеспечивает. Наконец, стоимость хорошего моста вместе со всеми необходимыми для него принадлежностями значительна.

Большим преимуществом мостовых схем является то, что они могут быть составлены из отдельных магазинов сопротивлений, точность подгонки которых обычно значительно выше точности даже очень хороших стрелочных приборов; к тому же эта точность хорошо сохраняется — она может быть нарушена только старением металла, из которого изготовлены сопротивления, между тем как точность стрелочных приборов определяется в гораздо большей степени состоянием их подшипников и пружин (волосков) и легко теряется, например, при перегрузке или при недостаточно аккуратной перевозке.

По этой причине применение мостовых схем может быть особенно рекомендовано в тех случаях, когда в задачу измерения входит по возможности более правильное определение абсолютной величины сопротивления, вопрос же о затрате времени на измерение не играет роли.

Примером измерений такого рода являются периодические измерения сопротивлений обмоток машин в процессе эксплуатации, преследующие цель выявления нарушений контактов или возникновения замыканий витков в этих обмотках.

Способ омметра с логометром весьма прост и обеспечивает быстроту измерения, так как стрелка логометра указывает величину измеряемого сопротивления прямо по шкале, но этот способ отличается наименьшей точностью и потому не может быть рекомендован.

Всем предъявленным требованиям лучше всего удовлетворяет способ вольтметра и амперметра, который при условии применения приборов соответствующего класса обеспечивает требуемую точность, дает наибольшую быстроту измерения и легко приспособляется к требованию подвижности. При выборе приборов для него нужно обратить особое внимание на то, чтобы они имели как можно меньшую вариацию показаний,

Для того чтобы способ вольтметра и амперметра давал достаточно правильные результаты, необходимо соблюдение ряда условий.

1. Вольтметр должен присоединяться непосредственно к зажимам измеряемого сопротивления (рис. 1-1); если для присоединения применяются иглы, то они должны быть хорошо заточенными и стальными, но отнюдь не латунными или медными.

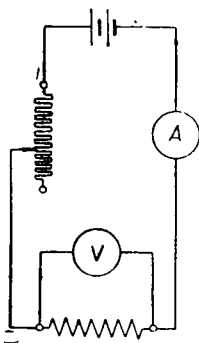


Рис. 1-1. Схема для измерения сопротивлений по способу вольтметра и амперметра.

2. Количество разъемных контактов в схеме должно быть наименьшим возможным, а все неразъемные контакты следует надежно пропаять.

3. Источником постоянного тока должна служить хорошо заряженная батарея аккумуляторов; в случаях, когда вследствие малой величины измеряемого сопротивления приходится производить измерение на больших токах, источником может служить отдельный генератор постоянного тока, по возможности с независимым возбуждением.

4. Отсчеты по обоим приборам должны производиться одновременно двумя наблюдателями по команде одного из них. Более правильно, чтобы команда подавалась наблюдателем на вольтметре, потому что показания этого прибора гораздо менее устойчивы, чем показания амперметра, вследствие заметной индуктивности, почти всегда присущей обмоткам электрических машин.

5. Каждое сопротивление следует измерять при нескольких различных значениях тока, переходя от больших к меньшим. Нормально количество измерений берется равным трем; при испытаниях повышенной точности его рекомендуется брать не меньшим пяти.

6. При измерении одного и того же сопротивления следует по возможности остерегаться менять пределы измерения приборов с тем, чтобы все измерения были произведены при одних и тех же пределах.

7. При измерениях повышенной точности следует учитывать поверочные поправки приборов по их свидетельствам.

8. Во избежание нагревания обмотки измерительным током, величина последнего не должна превосходить 20% номинального тока обмотки.

9. Подсчет результатов измерения должен производиться немедленно по его окончании.

10. Чтобы измерения протекали быстро и правильно, необходимо придерживаться определенного порядка их производства.

При подключении объекта измерения к устройству и замы-

кании цепи измерительного тока амперметр и вольтметр должны быть предварительно включены на наибольшие пределы измерения; еще лучше, если цепь вольтметра к тому же еще и разомкнута. После замыкания цепи тока приспособление, регулирующее ток, ставится в положение наибольшего измерительного тока. Если при этом показание амперметра меньше 40% его полной шкалы, необходимо перейти на следующий, меньший предел измерения, и так далее до тех пор, пока не будет получено удовлетворительное отклонение. После этого можно замкнуть цепь вольтметра и произвести подбор его предела измерения таким же самым способом. Когда пределы шкал обоих приборов установлены, можно приступить к отсчетам их показаний. После отсчета ток понижается регулирующим приспособлением и производится второй отсчет, и так далее.

Если измеряемое сопротивление обладает сильно выраженной индуктивностью, то на момент каждого перехода с высшей ступени измерительного тока на низшую необходимо размыкать цепь вольтметра, иначе его очень легко повредить импульсами электродвижущей силы, индуктированной при резком понижении измерительного тока.

По окончании измерения оба прибора должны быть немедленно вновь поставлены на наибольшие пределы измерения, а регулирующее приспособление оставлено на низшей ступени тока.

Когда сопротивление цепи вольтметра на данном пределе измерения настолько велико по сравнению с величиной измеряемого сопротивления, что потреблением тока в вольтметре можно пренебречь, искомое сопротивление  $r$  может быть представлено как результат деления измеренного напряжения  $U$  на измеренный ток  $I$ :

$$r = \frac{U}{I}.$$

Если обозначить через  $c_v$  цену деления вольтметра, через  $v$  его отклонение в делениях, а через  $c_a$  и  $a$  — соответствующие величины для амперметра, то результат измерения может быть получен и так:

$$r = \frac{c_v}{c_a} \cdot \frac{v}{a}.$$

При подсчете измеренной величины сопротивления нет необходимости переводить показания приборов в вольты и амперы для каждого отдельного измерения; достаточно множить отношение показаний в делениях на отношение их цен делений, что сильно сокращает подсчеты.

Когда же сопротивление цепи вольтметра недостаточно велико по сравнению с сопротивлением объекта измерения, и потреблением тока в вольтметре пренебречь нельзя, приходится производить учет его влияния на результат измерения.

Если обозначить через  $r_v$  сопротивление цепи вольтметра, то искомое сопротивление будет:

$$r = \frac{U}{I - \frac{U}{r_v}} = \frac{c_v v}{c_a a - \frac{c_v v}{r_v}}.$$

В такой форме это выражение неудобно для подсчетов; чтобы придать ему более удобный вид, следует умножить числитель и знаменатель дроби в знаменателе выражения на  $c_a$ :

$$r = \frac{c_v v}{c_a a - \frac{c_a c_v v}{c_a r_v}} = \frac{c_v}{c_a} \cdot \frac{v}{a - kv},$$

где

$$k = \frac{c_v}{c_a} \cdot \frac{1}{r_v}.$$

Величины  $k$  могут быть заранее подсчитаны для всех значений  $c_a$ ; для данного вольтметра отношение  $c_v : r_v$  постоянно на всех пределах его измерения, если только при этом сохраняется схема его внутренних соединений.

**Пример.** Производится измерение сопротивления обмотки возбуждения двигателя постоянного тока. Для измерения применены: магнитоэлектрический вольтметр со шкалой на 150 делений, с пределом измерения 15 в, и такой же амперметр с пределом измерения 0,3 а. Сопротивление цепи вольтметра составляет 5000 ом. При трех произведенных отсчетах получены следующие показания приборов:

Вольтметр: 112,2 96,7 80,4

Амперметр: 98,9 85,1 70,7

Требуется определить сопротивление обмотки с учетом тока, расходуемого в цепи вольтметра.

Цена деления вольтметра при пределе измерения 15 в составляет:

$$c_v = \frac{15}{150} = 0,1 \text{ в/дел.}$$

Цена деления амперметра при пределе измерения 0,3 а будет:

$$c_a = \frac{0,3}{150} = 0,002 \text{ а/дел.}$$

Постоянная  $k$  для данного случая равна:

$$k = \frac{c_v}{c_a r_v} = \frac{0,1}{0,002 \cdot 5000} = 0,01.$$

Таким образом, для учета тока, расходуемого в цепи вольтметра, следует от каждого показания амперметра отнять 1% от соответствующего показания вольтметра.

Если измерение сопротивления производится приборами класса точности 0,2, то вносимая поправка в пять раз превосходит допустимую погрешность амперметра, а потому обязательно должна быть учтена.

Вычисление результатов измерения по формуле

$$r = \frac{c_v}{c_a} \frac{v}{a - kv} = \frac{50v}{a - 0,01v}$$

дает следующие значения сопротивления:

$$57,4; 57,45; 57,4 \text{ ом.}$$

Очевидно, за величину искомого сопротивления следует принять  $r = 57,4 \text{ ом}$ ; если бы поправка не была введена, то результат измерения составлял  $56,8 \text{ ом}$ , т. е. на  $0,6 \text{ ом}$  меньше.

Вне зависимости от того, каким способом измеряется сопротивление в холодном состоянии, его измеренная величина должна быть приведена к определенной условной температуре для того, чтобы была возможность его сравнения с расчетом или с другими аналогичными объектами.

В электромашиностроении за такую условную температуру принимается обычно  $+15^\circ \text{C}$ .

Известно, что между сопротивлением металлического проводника  $r_\vartheta$  при температуре  $\vartheta$  и его сопротивлением  $r_{15}$  при температуре  $15^\circ \text{C}$  существует зависимость:

$$r_\vartheta = r_{15} [1 + \alpha(\vartheta - 15)],$$

где  $\alpha$  есть температурный коэффициент материала проводника, равный относительному увеличению его удельного сопротивления при повышении температуры на  $1^\circ \text{C}$ . Отсюда

$$r_{15} = \frac{r_\vartheta}{1 + \alpha(\vartheta - 15)}.$$

Для меди можно с практически достаточной точностью считать  $\alpha = 0,004 = \frac{1}{250}$ , для алюминия  $\alpha = 0,00385 \approx \frac{1}{260}$ .

В приложениях III и IV даны таблицы поправок для приведения измеренных сопротивлений к температуре  $+15^\circ \text{C}$ , составленные по этой формуле для промежутка от  $0^\circ \text{C}$  до  $+30^\circ \text{C}$ , что является вполне достаточным для измерений, производимых в закрытых отапливаемых помещениях.

Для определения температуры обмоток при измерении их сопротивления в холодном состоянии не рекомендуется пользоваться показаниями термометров, находящихся вне машины; необходимо закладывать термометры внутрь машины заблаговременно — за  $20-30 \text{ мин}$ , чтобы они могли к моменту измерения воспринять температуру частей машины. ГОСТ 7217-54, п. 6 рекомендует в случае невозможности непосредственного измере-

ния температуры обмоток выдерживать машины в нерабочем состоянии в окружающей среде в течение не менее 5 часов для машин до 10 кВт, не менее 8 час — для машин от 10 до 100 кВт и не менее 16 час — для машин от 100 до 1000 кВт; однако за это время сама температура окружающей среды может весьма значительно измениться, что необходимо учитывать.

### 1-6. Испытание при повышенной скорости вращения

Для проверки механической прочности вращающихся частей машины в отношении центробежных сил программы типовых и контрольных испытаний предусматривают испытание при повышенной скорости вращения всех выпускаемых машин, кроме тех, в программах испытания которых имеются на этот счет особые примечания.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 16, машина должна выдержать это испытание в течение двух минут без повреждений и остаточных деформаций (разумеется, не только металлических частей, но и изоляции обмоток).

По этой причине испытание при повышенной скорости вращения должно производиться до испытания изоляции обмотки вращающейся части относительно корпуса, а если вращающейся частью машины любого вида является якорь, т. е. если на ней расположена обмотка, в которой индуцируются электродвижущие силы, — то и до испытания изоляции витков этой обмотки.

Как правило, испытание производится повышением скорости вращения на 20 % сверх номинальной, а если машина имеет несколько номинальных скоростей вращения, то сверх наибольшей из них.

Однако некоторые виды электрических машин благодаря особенностям условий их работы нуждаются в испытании при более значительном повышении скорости вращения; предписания соответствующих стандартов в этом отношении рассматриваются при описании особенностей испытания таких машин.

Испытание при повышенной скорости вращения представляет ряд трудностей.

**1. Привод.** Если испытываемая машина сама является такой машиной постоянного тока, которая может быть пущена в режиме двигателя, или если она при испытании сопрягается с двигателем постоянного тока, имеющим достаточную мощность и, что важнее всего, достаточную механическую прочность, то повышение скорости вращения осуществляется беспрепятственно.

Повышение скорости вращения приводного двигателя постоянного тока целесообразнее производить повышением приложенного напряжения, нежели понижением возбуждения.

Если же приводным двигателем является двигатель переменного тока (кроме некоторых систем коллекторных двигателей, допускающих регулирование скорости выше синхронной), то повышение скорости вращения возможно следующими способами:

а) Повышение частоты подведенного напряжения. Для этого источник переменного тока должен иметь привод, допускающий необходимое повышение его скорости вращения. Если испытанию подвергается такая машина переменного тока, которую можно пустить в режиме двигателя, то напряжение повышенной частоты может быть приложено и непосредственно к ней.

б) Замена вспомогательного двигателя более быстроходным. В случае, если последний представляет асинхронный двигатель с фазовым ротором, его номинальная скорость вращения должна быть не меньше, но может быть и больше той, которую требуется получить; тогда избыток скорости погашается введением в цепь ротора реостата — регулятора скольжения. Если же это асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором или синхронный двигатель, — номинальная скорость вращения должна быть равна требуемой.

в) Введение повышающего редуктора скорости между вспомогательной и испытываемой машинами.

г) Питание фазового ротора асинхронного двигателя от преобразователя частоты — асинхронного или коллекторного. Общий недостаток многочисленных возможных схем такого питания — их сложность и трудность подбора входящих в них элементов.

**2. Безопасность испытания.** Наименьшую опасность представляет испытание машин постоянного тока и асинхронных двигателей с фазовыми роторами, в которых наиболее слабым местом являются проволочные бандажи на лобовых частях обмотки. Разрыв таких бандажей в закрытых и защищенных машинах представляет аварию, не выходящую из пределов машины; только при машинах совершенно открытого исполнения возможно нанесение повреждений окружающим предметам и персоналу. Вполне достаточным мероприятием по обеспечению безопасности в подобных случаях является удаление из опасной зоны всего того, что может пострадать от разлетающихся обрывков бандажей.

Напротив, наибольшую опасность представляет испытание синхронных машин с литыми или коваными ободами роторов, особенно в тех случаях, когда они имеют явно выраженные полюса, укрепленные болтами. Разрыв обода или отрывание полюсов представляет крупную аварию, ведущую к полному разрушению машины, если ротор подвергается испытанию в ста-



торе. Такие испытания должны проводиться в специально оборудованных блиндажах или ямах; в крайнем случае, если это невозможно, то в часы, когда помещение свободно от персонала, не занятого непосредственно данным испытанием.

Особое внимание следует уделять машинам, у которых вращающаяся часть имеет вентилятор или вентиляционные крылья. Массы этих деталей обычно невелики, но, вылетая с большой скоростью, их оторвавшиеся куски могут быть причиной несчастного случая. Это в особенности касается вентиляторов турбогенераторов.

**3. Измерение скорости вращения.** Пользование ручным тахометром для измерения скорости вращения при испытании может подвергать опасности измеряющего. Поэтому широко применяются всякого вида дистанционные тахометры. В отдельных случаях возможно применение вибрационных тахометров или частотомеров, располагаемых на плите или на подшипнике испытываемой машины; их показания могут быть ясно разобраны с довольно значительного расстояния.

Если повышение скорости вращения производится способом повышения частоты питания, то скорость вращения может определяться по этой частоте; при этом, если для привода испытываемой машины применен асинхронный двигатель настолько небольшой мощности, что механические потери испытываемой машины представляют для него заметную нагрузку, следует производить повышение частоты с запасом, достаточным для компенсации его скольжения.

При испытаниях роторов синхронных машин вне статора можно применить катушку с сердечником, соединенную с вибрационным частотомером; сердечник располагается на некотором расстоянии от активной поверхности полюсов. Если подать в их обмотку небольшое возбуждение, то при достаточном числе витков катушки индуктированная в ней электродвижущая сила приводит в действие частотомер; необходимо следить за тем, чтобы сердечник катушки был надежно закреплен, так как в противном случае он может быть притянут полюсами ротора.

### **1-7. Испытание изоляции обмоток относительно корпуса**

Программы испытаний машин всех видов содержат испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками, которое является обязательным для каждой новой машины, выпускаемой заводом-поставщиком.

Согласно указаниям ГОСТ 183-55, п. 57, это испытание для всех обмоток, кроме обмоток роторов турбогенераторов, должно

производиться при неподвижном состоянии машины, и если она подвергалась испытанию на нагревание, то немедленно по его окончании при температуре обмоток, близкой к рабочей. Но если испытание на нагревание не производилось, то испытание изоляции производится при практически холодных обмотках; несмотря на то, что условия работы изоляции в холодном и нагретом состояниях неодинаковы, стандарт не делает между ними никакого различия.

Испытание изоляции обмоток роторов турбогенераторов должно производиться при вращении их с номинальной скоростью, желательно в нагретом состоянии; это необходимо потому, что под влиянием центробежных сил обмотка может продавливать изоляцию, особенно в лобовых частях, а при неподвижном состоянии значительно отходить от продавленных мест и таким образом скрывать повреждение изоляции.

Далее, стандарт там же требует, чтобы испытанию изоляции предшествовали измерение сопротивления изоляции, испытание при повышенной скорости вращения и испытание при кратковременной перегрузке по току, так как в процессе проведения последних двух из них изоляция может получить повреждения, а первое служит для предварительного контроля состояния изоляции.

Исключение из этого правила делается только для машин постоянного тока с номинальным напряжением до 36 в включительно, для которых испытательное напряжение имеет настолько низкую величину, а изоляция — такие большие относительные запасы, что необходимость в указанной очередности становится излишней.

Испытанию подвергается поочередно каждая электрически независимая цепь, причем все остальные обмотки на это время соединяются с корпусом. В машинах постоянного тока обмотка якоря и соединенные последовательно с ней обмотки главных и добавочных полюсов могут считаться за одну цепь; но обмотки параллельного или независимого возбуждения как главных, так и добавочных полюсов должны рассматриваться как электрически независимые цепи. В машинах переменного тока электрически независимой цепью считается всякая обмотка, начало и конец которой имеют самостоятельные выводы; в частности, это распространяется на отдельные фазы многофазных обмоток, имеющих выводы начал и концов всех фаз.

В машинах постоянного тока и в асинхронных двигателях с фазовым ротором, имеющих проволочные или массивные бандажи на лобовых частях обмотки, изолированные от корпуса, должна быть подвергнута испытанию изоляция этих бандажей от обмотки. Для этой цели вполне достаточно во время испытания обмотки относительно корпуса соединить с ним все бандажи. Если это почему-либо неудобно, изоляция бандажей должна

быть испытана отдельно тем же напряжением, которое предписано для обмотки, при соединении обмотки с корпусом.

Исключение из этого составляют некоторые мелкие машины постоянного тока, в которых бандажи используются в качестве уравнительных соединений петлевой обмотки якоря; изоляция таких бандажей, естественно, не может быть испытана относительно обмотки.

Изолированные обмотки, постоянно соединенные с корпусом, должны быть на время испытания отсоединены от него.

Испытание производится прикладыванием между испытываемой обмоткой и корпусом машины переменного практически синусоидального напряжения промышленной частоты, т. е. около 50 гц.

Испытательное напряжение не должно прикладываться мгновенно, так как крутизна фронта волны напряжения облегчает пробой изоляции, а кроме того, при мгновенном включении возможны перенапряжения. Стандарт предписывает начинать испытание не более, чем с 30% окончательного значения напряжения; если регулирование напряжения происходит ступенями, то последние не должны превышать 5% окончательного значения, причем подъем напряжения от половинного до полного значения должен занимать не менее 10 сек.

Во всех случаях полное напряжение выдерживается в течение одной минуты, после чего оно должно быть сначала снижено до 30% полного значения, а потом уже может быть отключено. Продолжительность снижения напряжения стандартом не установлена. Подразделение на части того времени, в течение которого должно продолжаться испытание, недопустимо. Во время действия приложенного испытательного напряжения в изоляции обмотки происходят накапливающиеся изменения, которые увеличивают вероятность пробоя. Если подразделить время испытания на части, то к концу каждой из них сумма изменений будет меньше той, которая имеет место в конце полного времени испытания, произведенного без перерывов; следовательно, прерванное испытание является облегченным по сравнению с требованиями стандарта.

Изоляция считается выдержавшей испытание, если не произошло ее пробоя; при этом явление короны или возникновение поверхностных скользящих разрядов не принимаются во внимание. Однако с поверхностными разрядами не следует смешивать пробой по поверхности. Разница между ними состоит в том, что поверхностный разряд, начавшись при некотором напряжении, исчезает после его понижения и вновь возникает при этом же напряжении, между тем как пробой по поверхности прекращается только после более или менее сильного понижения напряжения, а при повторном прикладывании напряжения он начинается при значительно меньшей его величине, так как

нередко сопровождается обугливанием покровных слоев изоляции и резким понижением ее сопротивления.

В большинстве случаев пробой по поверхности происходит вследствие ее загрязнения; особенно характерным это является для машин, имеющих щеточные контакты, поскольку внутренние поверхности таких машин в большей или меньшей степени загрязнены пылью от щеток. Очень часто после тщательной очистки поверхности пробой больше не повторяется, если только при нем не произошло упомянутого обугливания. Если принять за правило перед испытанием изоляции производить тщательную очистку и продувку машины сжатым воздухом, то случаи пробоа по поверхности будут наблюдаться очень редко.

В приложении I дана таблица испытательных напряжений для различных обмоток, извлеченная из ГОСТ 183-55, п. 27 и некоторых других стандартов; большинство этих напряжений определяется по формулам вида:

$$U_{\text{и}} = U_{\text{п}} + kU_{\text{н}},$$

где  $U_{\text{и}}$  — испытательное напряжение;

$U_{\text{п}}$  — некоторое постоянное напряжение для обмоток данного рода;

$U_{\text{н}}$  — номинальное напряжение обмотки;

$k$  — коэффициент, не меньший двух.

Для некоторых обмоток испытательное напряжение берется по более простой формуле:

$$U_{\text{и}} = kU_{\text{н}}.$$

Во многих случаях стандартом устанавливается минимальное испытательное напряжение, ниже которого оно не должно спускаться независимо от величины напряжения, получаемого из соответствующей формулы, а в некоторых случаях устанавливается также и максимальное испытательное напряжение.

Чем больше номинальная мощность машины, тем выше требования, предъявляемые к изоляции ее обмоток, что находит некоторое отражение в таблице. Так, например, машины с номинальным напряжением свыше 6600 в при номинальной мощности до 1000 квт (или ква) испытываются напряжением

$$U_{\text{и}} = 1000 + 2U_{\text{н}},$$

в то время как при мощности свыше 1000 квт (или ква) — напряжением

$$U_{\text{и}} = 3000 + 2U_{\text{н}}.$$

Если машина обматывается на месте установки, что иногда имеет место, например, в отношении крупных гидрогенераторов, а в отдельных случаях — и турбогенераторов, то испытание изо-

ляции должно производиться тем же самым напряжением, дабы не снижать электрической надежности изоляции этих машин.

Нередко практикуется перевозка громоздких машин на место установки отдельными обмотанными частями. Если каждая из них подвергалась на заводе-изготовителе испытанию по предписаниям таблицы, то после сборки на месте установки и сушки вполне собранная машина подвергается повторному испытанию напряжением в 75% от указываемого таблицей. Однако, если часть обмотки укладывается на месте установки (как, например, секции разъемных статоров гидрогенераторов и дизель-генераторов, находящиеся против мест разъема), то эта часть до соединения с уложенной на заводе испытывается напряжением в 100% от предписываемого таблицей, а после окончательного соединения и сушки вся обмотка — напряжением в 75% от табличного.

Повторное испытание таким напряжением на месте установки в случае машины, доставленной в собранном виде, для турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов является обязательным, а для прочих машин производится по усмотрению заказчика.

Если при ремонте бывшей в эксплуатации машины переменного тока вся изоляция обмотки статора или ротора была заменена новой, то испытание ее производится так, как для новой машины, т. е. полным испытательным напряжением. Это же может быть распространено на якоря машин постоянного тока лишь тогда, когда одновременно с заменой всей изоляции обмотки производится также замена изоляции коллектора от корпуса; в противном случае такому испытанию обмотка может быть подвергнута только до соединения с коллектором, после которого испытание должно быть произведено, как при частичном ремонте обмотки. Именно, если при ремонте изоляции часть обмотки заменена новой, то испытанию, согласно предыдущему, может быть подвергнута только эта часть обмотки до соединения с остальной обмоткой, после чего вся обмотка испытывается напряжением, пониженным против испытательного напряжения, указанного для данного рода обмоток, по усмотрению заказчика.

Испытание изоляции должно производиться в вполне готовой, окончательно собранной машине; при испытании в несобранном виде остаются невыявленными места возможного пробоя изоляции, могущие возникнуть после полной сборки, например между лобовыми частями обмотки статора и щитами или вентилятором.

При массовом производстве, особенно мелких машин, нет принципиальных препятствий к групповому испытанию изоляции, которому одновременно подвергается несколько машин с одинаковыми испытательными напряжениями, при условии, что для каждой из них испытание во всем согласуется с требованиями.

ми стандарта. В случае пробоя изоляции одной из них, происшедшего в пределах времени испытания, остальные должны быть подвергнуты полному испытанию без зачета того времени, в течение которого они уже находились под испытательным напряжением до момента этого пробоя.

Операция испытания не ограничивается одним лишь установлением факта пробоя изоляции, если он имел место; необходимо еще найти, где именно произошел пробой, для того чтобы было известно, как его устранить.

Нахождение места пробоя производится повторным прикладыванием напряжения и наблюдением за появлением искр, выделением дыма или возникновением треска от проскакивающей искры, не видной снаружи. В тех случаях, когда место пробоя скрыто от наблюдения (например находится в пазовой части обмотки), приходится отыскивать его подразделением испытываемой обмотки последовательно на все меньшие и меньшие части путем распайки соединений и отделения здоровых частей от поврежденной.

Наибольшие трудности представляет нахождение места пробоя в обмотках роторов синхронных машин с неявновыраженными полюсами, которые со всех сторон окружены металлом и недоступны для наблюдения. При отыскании мест пробоя в этих условиях нередко приходится прибегать к методам, применяемым при определении места пробоя в кабелях. Большинство таких пробоев приходится в лобовых частях под бандажами, которые для ремонта необходимо снимать, что представляет нелегкую задачу даже в условиях завода; поэтому большим успехом можно считать, когда удастся определить, под каким именно бандажом произошел пробой, дабы избежать снятия второго бандажа.

При испытаниях на местах установки иногда приходится встречаться с предложениями испытания электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса посредством кенотронов, применяемых для испытания изоляции кабелей. Так как кенотрон является источником выпрямленного напряжения, такое испытание не предусматривается требованиями стандарта, которые построены из расчета на переменное напряжение промышленной частоты и не содержат указаний о замене его каким-либо эквивалентным постоянным или выпрямленным напряжением.

Однако в ряде случаев такое испытание представляет определенные преимущества; так, выпрямленный ток легко поддается измерению с большой точностью, что используется для сравнительной оценки состояния изоляции машины по величине токов утечки через нее. Поэтому испытание изоляции крупных синхронных машин выпрямленным напряжением наряду с переменным напряжением включено в программу приемо-сдаточных ис-

пытаний этих машин. При этом испытание выпрямленным напряжением следует считать эквивалентным по градиентам электрического поля при значении выпрямленного напряжения в 1,6 раза больше действующего значения соответствующего переменного напряжения.

Ниже приводятся некоторые практические указания о проведении испытания электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины.

Первым и самым важным из них является обязательность измерения испытательного напряжения непосредственно на выводах источника этого напряжения, которым обычно служит повысительный трансформатор.

Большинство измерителей напряжения учитывает его действующее значение, между тем как пробой изоляции определяется наибольшим значением; поэтому резкие отступления кривой напряжения от практической синусоидальности облегчают пробой. Так, если сравнить наибольшие значения чисто синусоидального и треугольного напряжений с одинаковыми действующими значениями, то окажется, что последнее из них имеет на 22 % более высокое наибольшее значение.

Между тем условия испытания благоприятствуют искажению синусоидальности напряжения, поскольку испытываемая изоляция представляет для источника напряжения емкостную нагрузку, при которой легко возникают резонансные явления.

Поэтому целесообразно не только производить измерение испытательного напряжения, но и контролировать форму его кривой. Такой контроль может осуществляться включением шарового разрядника на выводах источника.

Перед началом испытания шаровой разрядник устанавливается таким образом, чтобы его воздушный промежуток пробивался при некотором повышении напряжения сверх заданного значения, измеряемого, например, при помощи вольтметра с трансформатором напряжения. Если при испытании не будет происходить пробивания шарового разрядника при достижении испытательного напряжения по вольтметру или даже ранее этого, то отсутствие искажения формы кривой испытательного напряжения можно считать установленным.

Чтобы пробивание шарового разрядника не представляло короткого замыкания источника, в цепь разрядника рекомендуется включать значительное сопротивление, например водяное.

Другим способом проверки является применение осциллографа, преимущественно электронно-лучевого. Можно также включать параллельно два вольтметра, один из которых, например электромагнитный, измеряет действующее значение напряжения, а другой, например электростатический или катодный, измеряет наибольшее значение, но отградуирован на действующие значения при синусоидальном напряжении; тогда совпаде-

ние показаний обоих вольтметров будет служить достаточной гарантией отсутствия искажений.

Однако недостаточно иметь возможность проверки отсутствия или наличия искажений; необходимо принимать меры для их предотвращения.

Такой мерой является прежде всего устранение высших гармонических из кривой напряжения, приложенного к источнику. Для этого следует всемерно избегать питания испытательного устройства фазным напряжением трехфазной системы с нулевым проводом, так как в нем обычно содержится третья гармоническая, особенно опасная в отношении искажения синусоидальности кривой напряжения.

Другим мероприятием является недопущение перегрузки повысительного трансформатора по току и по потоку. Для этого трансформатор должен иметь достаточную номинальную мощность и запас по номинальному напряжению.

Обычно считается, что мощность трансформатора должна составлять 0,5—1,0 *кВа* на каждые 1000 в номинального напряжения; но при испытании крупных машин и этого может оказаться недостаточно. Так, например, для испытания одной фазы обмотки статора турбогенератора мощностью 100 000 *кВт* при номинальном напряжении 15 750 в и при испытательном напряжении 34 500 в требуется мощность от 80 до 120 *кВа* (в зависимости от сорта примененных изоляционных материалов).

Наконец, пользу приносит также включение некоторой активной нагрузки в цепь обмотки низшего напряжения трансформатора. Последовательно включенное сопротивление предохраняет также источник регулируемого напряжения от перегрузки при пробое испытываемой изоляции.

Испытательное напряжение даже самых умеренных величин представляет опасность для персонала; поэтому должны приниматься самые тщательные меры предохранения от поражения напряжением.

При испытании машин небольших размеров могут применяться шкафы и загородки с блокированными дверьми; но испытание более крупных машин поневоле приходится производить на том же месте испытательного стенда, на котором они проходят все прочие испытания. Тогда для безопасности персонала могут быть применены переносные ограждения, также с блокировкой, с сигнальными лампами и с предупредительными плакатами. Вместе с тем необходима расстановка постов охраны вокруг огражденной площадки.

Сигнальные лампы должны загораться до момента включения источника испытательного напряжения, а аппарат, включающий его, должен быть блокирован ограждением, при нарушении которого включение становится невозможным,



Принципиальная схема установки средних и крупных размеров для испытания электрической прочности изоляции обмоток, отвечающей всем изложенным выше требованиям, представлена на рис. 1-2.

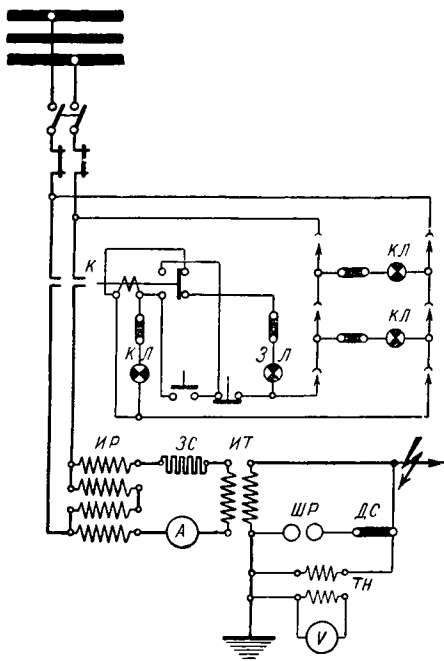


Рис. 1-2. Принципиальная схема установки для испытания изоляции:

*К* — контактор; *ИР* — индукционный регулятор; *ЗС* — защитное сопротивление; *ИТ* — испытательный трансформатор; *ШР* — шаровой разрядник; *ДС* — добавочное сопротивление; *ТН* — трансформатор напряжения; *КЛ* — красная лампа; *ЗЛ* — зеленая лампа.

#### 1-8. Испытание междувитковой изоляции обмоток

Испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток является неременной составной частью программы типовых и контрольных испытаний машин всех видов.

Следует оговорить, что оно не распространяется на обмотки индукторов машин постоянного тока и синхронных машин, междувитковая изоляция которых не может быть испытана в

собранной машине и испытывается до сборки, а потому испытание ее должно быть отнесено к пооперационному контролю производства.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 28, междувитковая изоляция обмоток электрических машин большинства видов должна выдерживать в течение пяти минут при холостом ходе машины повышение приложенного напряжения (если испытание производится в режиме двигателя) или генерируемого напряжения (если испытание производится в режиме генератора) на 30% сверх номинального напряжения.

Исключение из этого правила составляют некоторые виды машин, которые по условиям своей работы требуют более высокой надежности междувитковой изоляции обмоток; требования в отношении этих машин рассматриваются при описании особенностей их испытания.

Стандарт разрешает повышение частоты при испытании междувитковой изоляции машин переменного тока (однако при вращающихся машинах не более чем на 15% сверх номинальной), так как в некоторых случаях поднять напряжение до предписанного значения при номинальной частоте может оказаться невозможным.

Испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток представляет свои опасности, особенно в крупных машинах открытого исполнения. Пробой междувитковой изоляции может сопровождаться взрывообразной вспышкой с выбрасыванием капель расплавленного металла, от которых могут пострадать окружающие. Для предупреждения этого следует удалять персонал от машины на время испытания. В машинах постоянного тока, кроме того, добавляется опасность возникновения кругового огня на коллекторе, который, помимо разбрызгивания капель металла, опасен еще своим ослепляющим действием; поэтому нужно предписывать всему персоналу даже издали не смотреть на машину, особенно на ее коллектор.

### 1-9. Испытание на нагревание

Программы типовых испытаний электрических машин всех видов содержат испытание на нагревание в том или ином виде. Мало того, оно содержится в программах приемо-сдаточных испытаний крупных синхронных машин, установленных специализированными стандартами на эти машины, а также в программах контрольных испытаний некоторых специальных машин, для которых оно является существенно важным.

В принципе испытание на нагревание сводится к определению превышений температуры различных частей машины (под которыми понимаются разности между температурой данной части и температурой охлаждающей среды, см. ГОСТ

183-55, приложение, п. 21), полученных в результате ее работы в номинальном или ином заданном режиме.

Наиболее естественным является фактическое осуществление данного режима, т. е. создание соответствующей ему нагрузки испытываемой машины.

Такое испытание носит название испытания на нагревание при непосредственной нагрузке.

Однако чем больше мощность испытываемой машины, тем труднее осуществление ее непосредственной нагрузки не только на заводе-поставщике, но и на месте установки, где далеко не всегда удастся осуществить и поддерживать заданный режим в течение необходимого времени.

Поэтому очень часто приходится заменять заданный режим каким-нибудь другим режимом, более легко осуществимым, при котором состав потерь, нагревающих отдельные части машины, был бы по возможности близок к имеющему место при заданном режиме.

Подобное испытание называется испытанием на нагревание при искусственной нагрузке. Обычно результаты его нуждаются во введении некоторых поправок, определенных при помощи вспомогательных испытаний.

Если подобрать подходящий режим не удастся, то придется прибегать к ряду испытаний, в которых нагревание различных частей машины производится поочередно разными видами потерь, существующих при заданном режиме одновременно, и к последующему предопределению искомого превышения температуры этих частей на основании ряда полученных результатов. Эти испытания получили название испытаний на нагревание косвенным методом.

В соответствии с различными видами номинальных режимов, режимы испытания могут быть продолжительными, кратковременными и повторно-кратковременными.

Согласно ГОСТ 183-55, приложение, п. 2, продолжительным номинальным режимом работы электрической машины называется режим работы при неизменной номинальной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышения температуры всех частей машины при неизменной температуре охлаждающей среды достигают практически установившихся значений.

При этом под практически установившейся температурой какой-либо части машины понимается температура, изменение которой не превышает  $1^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа, при условии, что как нагрузка машины, так и температура охлаждающей среды остаются неизменными (ГОСТ 183-55, приложение, п. 23).

Однако практика испытания электрических машин обычно подходит к оценке установившегося теплового состояния более

жестко, считая, что оно является достигнутым только тогда, когда последние три отсчета по всем применяемым измерителям температуры дают в основном повторяющиеся результаты.

Такое ужесточение, конечно, ведет к увеличению продолжительности испытания на нагревание и затраты энергии, но зато делает его результаты более достоверными и предотвращает возможность затраты еще большего количества времени и энергии на повторное испытание в случае получения недостаточно достоверных результатов.

Длительность испытания на нагревание в продолжительном режиме, если оно начато от практически холодного состояния машины, при прочих равных условиях зависит от номинальной мощности машины — возрастает с увеличением последней; но в еще большей степени она зависит от интенсивности вентиляции машины.

Чем интенсивнее вентиляция, тем быстрее устанавливается температура всех частей машины; поэтому длительность испытания на нагревание меньше всего для быстроходных хорошо вентилируемых машин и больше всего для машин тихоходных и слабо вентилируемых, а тем более закрытых или герметических.

Так, длительность испытания на нагревание крупнейших двухполюсных турбогенераторов с воздушным охлаждением колеблется от 8 до 12 часов; примерно эту же длительность имеют испытания двигателей закрытого исполнения без обдува наружной поверхности мощностью всего лишь от нескольких киловатт до нескольких десятков киловатт.

Аналогично этому неодинакова длительность установления температуры для различных частей одной и той же машины: она тем меньше, чем лучше данная часть охлаждается вентилирующим машину воздухом. Температура вращающихся частей в общем устанавливается быстрее, чем неподвижных, так как первые лучше омываются охлаждающей средой. Таким образом, установление температуры неподвижных частей, в большинстве случаев более доступных для измерения температуры, может служить достаточным основанием считать, что и температура вращающихся частей установилась.

Для сокращения времени испытания не возбраняется в начале его перегрузить машину в таких пределах, которые являются допустимыми с точки зрения механической и электрической прочности машины (ГОСТ 183-55, п. 54); эта перегрузка может производиться одновременно как по току, так и по напряжению. В частности, в коллекторных машинах нужно наблюдать за тем, чтобы перегрузка не вызывала ухудшения коммутации, способного оставить на коллекторе и щетках такие повреждения, которые при дальнейшем испытании могут повлиять на их работу.

Однако чрезмерно перегретая машина может потребовать на установление температуры не меньше времени, чем недогретая,

в результате чего не только не получится никакого выигрыша времени от перегрузки, но, наоборот, потребуется лишняя его затрата.

В сильно вентилируемых машинах вместо перегрузки для ускорения испытания в начале его может применяться намеренное ухудшение вентиляции, например путем частичного или полного прикрывания отверстий для входа охлаждающего воздуха, а при замкнутом цикле вентиляции — резкое уменьшение расхода охлаждающей воды.

Если машина должна быть подвергнута испытаниям на нагревание в нескольких режимах, то целесообразно вести эти испытания одно за другим, не давая машине сильно остывать в промежутках между ними. Для этой цели может потребоваться организация непрерывной круглосуточной работы испытательной станции.

Указания о том, какие значения температуры и какими методами подлежат измерению при испытании на нагревание, даны ниже при рассмотрении особенностей этого испытания применительно к машинам того или иного вида.

Запись показаний всех применяемых измерителей температуры рекомендуется производить в среднем через каждые 30 мин; только при испытаниях крупных или весьма слабо вентилируемых машин, длящихся более 8 час, интервалы между отсчетами можно увеличить до 1 часа. Наоборот, при испытании небольших быстроходных и хорошо вентилируемых машин с продолжительностью испытания до 2 час целесообразно производить отсчеты чаще, например через каждые 15—20 мин.

Если при испытании на нагревание ни режим работы машины, ни температура охлаждающей среды не изменяются, то нарастание температуры всех частей машины должно подчиняться определенному закону. В теории теплопередачи доказывается, что при неизменности условий выделения тепла и постоянстве температуры охлаждающей среды приращение температуры нагреваемого тела  $\vartheta$  следует закону

$$\vartheta = \vartheta_k \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где  $\vartheta_k$  — конечное значение температуры;

$e$  — основание натуральных логарифмов;

$t$  — время, истекшее с момента начала нагревания;

$T$  — постоянная времени нагревания.

Пользуясь этим законом, ГОСТ 183-55, п. 54, допускает предопределение конечной температуры  $\vartheta_k$  до ее фактического установления путем графической экстраполяции кривой нарастания температуры.

Для этого приращения температуры  $\Delta\vartheta$ , измеренные через равные промежутки времени  $\Delta t$ , откладывают, как показано на

рис. 1-3. Продолжение прямой, проведенной через полученные точки, отсекает на оси ординат искомое конечное значение температуры  $\theta_k$ .

Предполагается, что применение этого способа позволит сократить испытание, когда превышение температуры достигнет 85—90% ожидаемого конечного значения, что значительно уменьшит продолжительность испытания; однако ввиду того, что для электрических машин указанный выше закон является приближенным, а также того, что весьма трудно сохранить неизменными режим работы машины и температуру охлаждающей среды, практическое применение этого способа наталкивается на значительные затруднения.

Одновременно с отсчетами по всем измерителям температуры следует производить отсчеты и по всем электроизмерительным и другим приборам, применяемым для контроля правильности установленного режима. При этом можно рекомендовать производить проверку режима в серединах промежутков времени между отсчетами и, если потребуется, устранять при этом отклонения от заданного режима с тем, чтобы при очередном отсчете не отвлекаться на регулировочные операции. Существенно важно, чтобы в протокол испытания вносились действительные результаты произведенных измерений, а не те значения измеряемых величин, которые установлены для данного испытания; протокол испытания с чрезмерно «гладкими» записями всегда внушает подозрение в недостаточной добросовестности его выполнения.

Кратковременным номинальным режимом работы электрической машины, согласно ГОСТ 183-55, приложение, п. 3, называется такой режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины, причем первые из них не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей машины могли достигнуть практически установившихся значений, а вторые достаточно длительны, чтобы все части машины пришли в практически холодное состояние.

Нормальные длительности кратковременных режимов установлены в 15, 30, 60 и 90 мин. (ГОСТ 183-55, п. 4); но в техни-

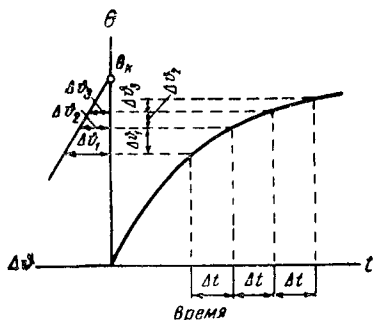


Рис. 1-3. Экстраполяция превышения температуры на основании его нарастания (извлечение из ГОСТ 183-55, п. 54).

ческих условиях на отдельные машины или виды машин нередко указываются и иные длительности, подчас значительно меньшие.

Испытание на нагревание в кратковременном режиме должно начинаться с практически холодного состояния машины, так как всякое предварительное превышение температуры ее частей будет искажать результаты испытания тем в большей степени, чем меньше длительность режима.

Степень использования машин, предназначенных для кратковременного режима, очень высока, так как за короткий промежуток времени превышения температуры их частей могут доходить до значений, достигаемых при продолжительном режиме за гораздо более длительный период, и даже превосходить эти значения. По этой причине при проведении испытания на нагревание в кратковременном режиме требуется очень высокая точность регулирования режима; это регулирование должно производиться непрерывно на протяжении всего режима, так как исправить допущенные ошибки в режиме нельзя, а неправильно проведенное испытание требует повторения, для чего машина предварительно должна быть остужена с непроизводительной потерей времени.

Отсчеты по измерителям температуры должны быть произведены по возможности одновременно в самом конце рабочего периода; это не препятствует тому, чтобы они производились и на протяжении этого периода, причем чем чаще, тем лучше, так как по нарастанию температуры легче контролировать правильность окончательных результатов.

Под повторно-кратковременным номинальным режимом работы электрической машины, согласно ГОСТ 183-55, приложение, п. 4, понимается такой режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с кратковременными периодами отключения машины (паузами), причем как те, так и другие не настолько длительны, чтобы превышения температуры отдельных частей машины могли достигнуть установившихся значений.

Повторно-кратковременный номинальный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ), выражаемой в процентах и представляющей отношение длительности рабочего периода к длительности полного цикла, т. е. суммы рабочего периода и паузы.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 4, нормальными считаются продолжительности включения с  $PB = 15; 25; 40$  и  $60\%$ , причем длительность одного цикла не превосходит 10 мин.

Однако техническими условиями могут быть оговорены и иные ПВ, главным образом меньшие и при меньшей длительности одного цикла.

Двигатели, предназначенные для повторно-кратковременного

режима, на время паузы отключаются от источника питания и останавливаются, генераторы же только отключаются от нагрузки, но продолжают вращаться. Как в тех, так и в других обмотки возбуждения могут оставаться непрерывно включенными, если это предусмотрено по характеру работы.

Испытание на нагревание при повторно-кратковременном режиме отличается от испытания в продолжительном режиме тем, что температура частей машины то повышается в течение рабочих периодов, то понижается в течение пауз.

Поэтому вместо понятия о практически установившейся температуре ГОСТ 183-55, п. 56, вводит для повторно-кратковременного режима понятие о практически повторяющихся значениях температуры в конце рабочих периодов и в конце пауз.

Под практически повторяющейся температурой какой-либо части машины при повторно-кратковременном режиме работы понимается температура этой части в моменты отключений, а также в моменты включений тока, изменение которой от одного рабочего периода к другому не превышает  $1^{\circ}\text{C}$  в течение одного часа, при условии, что нагрузка машины во время рабочих циклов и продолжительность включения остаются неизменными (ГОСТ 183-55, приложение, п. 23).

Испытание на нагревание при повторно-кратковременном режиме работы может быть начато как с холодного, так и с нагретого состояния машины; как и в случае испытания при продолжительном режиме работы, в целях сокращения длительности испытания в начале его может быть допущена либо перегрузка, либо преднамеренное ухудшение вентиляции, либо, просто, как рекомендует стандарт, соединение нескольких рабочих периодов в один без пауз (п. 56).

Длительность одного полного цикла при испытании принимается равной 10 мин. (если нет иных указаний в технических условиях на данную машину или вид машин).

Особое внимание при испытании должно быть обращено на правильность поддержания заданного значения ПВ; так как включение и отключение машины каждые 10 мин. вручную в течение нескольких часов с необходимой точностью представляет крайне утомительное занятие, и к тому же трудно поддается контролю, следует рекомендовать автоматизацию этого процесса, предпочтительно при помощи контактного устройства, приводимого асинхронным или реактивным двигателем и предварительно хорошо проверенного по секундомеру.

Измерение температуры предписано производить после истечения половины последнего рабочего периода.

При определенных условиях бывает возможно заменить испытание при повторно-кратковременном режиме испытанием при эквивалентном продолжительном режиме.



Подбор эквивалентного режима должен производиться так, чтобы выделение энергии потерями каждого вида за время, равное продолжительности одного полного рабочего цикла, было тем же самым, что и при повторно-кратковременном режиме.

Если обозначить через  $T_p$  длительность рабочего периода, а через  $T_{\kappa}$  — длительность всего цикла, то для того, чтобы основные потери в обмотках рабочей цепи давали одинаковое выделение энергии при повторно-кратковременном режиме с током  $I$  и при эквивалентном режиме с током  $I'$ , должно удовлетворяться равенство

$$I^2 T_p = I'^2 T_{\kappa},$$

откуда

$$I' = I \sqrt{\frac{T_p}{T_{\kappa}}} = I \sqrt{\frac{(\overline{ПВ})}{100}} = 0,1 I \sqrt{(\overline{ПВ})}.$$

Несколько труднее определить условие равенства выделения энергии от потерь в стали. Для машин переменного тока потери в стали можно с достаточной степенью точности принять пропорциональными квадрату напряжения; но для машин постоянного тока правильнее будет считать их пропорциональными квадрату электродвижущей силы в якоре  $E$ , которая в случае генератора больше, а в случае двигателя меньше напряжения  $U$  на величину суммы всех падений напряжения в цепи якоря:

$$E = U \pm (I \Sigma r + 2 \Delta U),$$

где  $\Delta U$  — падение напряжения в переходном контакте щеток одной полярности.

Таким образом, решение задачи сводится к определению напряжения  $U'$ , которое должно быть установлено в эквивалентном режиме.

Если машина в паузах отключается и останавливается, как это имеет место обычно для двигателей, то напряжение эквивалентного режима для машины переменного тока может быть определено подобно тому, как это сделано для тока эквивалентного режима, из равенства

$$U'^2 T_p = U'^2 T_{\kappa},$$

откуда

$$U' = 0,1 U \sqrt{(\overline{ПВ})};$$

для машины постоянного тока здесь вместо напряжений  $U$  и  $U'$  следует принять электродвижущие силы  $E$  и  $E'$ :

$$\begin{aligned} E &= U \pm (I \Sigma r + 2 \Delta U), \\ E' &= U' \pm (I' \Sigma r + 2 \Delta U). \end{aligned}$$

Но если машина в паузах не останавливается, а продолжает вращаться, притом возбужденная (как это обычно имеет место в генераторах), дело осложняется тем, что большей частью напряжение холостого хода  $U_0$  в паузах значительно возрастает против напряжения  $U$  при рабочем периоде. Тогда условием одинакового выделения энергии от потерь в стали для машины переменного тока будет служить равенство

$$U^2 T_p + U_0^2 (T_u - T_p) = U'^2 T_u,$$

откуда

$$U' = \sqrt{\frac{U^2 T_p + U_0^2 (T_u - T_p)}{T_u}} = \sqrt{\frac{U^2 (PB) + U_0^2 (100 - PB)}{100}},$$

а для машины постоянного тока напряжения  $U$  и  $U'$  должны быть заменены соответствующими им электродвижущими силами  $E$  и  $E'$ .

Наибольшие затруднения представляет вопрос о токе возбуждения для эквивалентного режима в случае самовозбуждающихся генераторов; будучи зависимым от напряжения и от тока нагрузки, при заданных значениях этих двух величин ток возбуждения уже не может быть изменен, и потому нагревание полюсных катушек в эквивалентном режиме может довольно заметно отличаться от того, которое соответствует данному повторно-кратковременному режиму.

Помимо изложенного, остается еще один фактор, который труднее всего учесть при переходе к эквивалентному режиму; фактор этот — вентиляция машины. Он не играет сколько-нибудь существенной роли в случае машин, продолжающих вращаться во время пауз с номинальной скоростью вращения, так как количество воздуха, протекающего через машину в эквивалентном режиме, в этом случае продолжает оставаться неизменным. Крайне малое влияние на результаты оказывает непрерывное вращение машины в эквивалентном режиме для машин закрытого исполнения без обдува наружной поверхности, через которую происходит охлаждение машины.

Но для машин с самовентиляцией, если во время пауз они должны останавливаться, действие вентиляции прерывается, между тем как при эквивалентном режиме оно остается непрерывным. Чтобы приблизить эквивалентный режим к имитируемому им повторно-кратковременному режиму, может применяться искусственное уменьшение расхода охлаждающего воздуха; оно должно быть подобрано опытным путем, что не всегда представляет легкую задачу, а иногда и вообще невыполнимо, как, например, для машин совершенно открытого исполнения,

**Пример.** Сварочный генератор постоянного тока имеет номинальный режим с напряжением  $U = 25$  в, током  $I = 300$  а и  $PB = 65\%$ . При холостом ходе во время пауз напряжение повышается до величины  $U_0 = 65$  в.

Требуется подобрать эквивалентный продолжительный режим при условии, что сопротивление последовательной цепи при рабочей температуре  $\Sigma r = 0,025$  ом.

Ток эквивалентного режима

$$I' = 0,1I\sqrt{PB} = \frac{300}{10}\sqrt{65} = 242 \text{ а.}$$

Электродвижущая сила при номинальной нагрузке составляет, полагая  $\Delta U = 1$  в,

$$E = U + (I \Sigma r + 2\Delta U) = 25 + (300 \cdot 0,025 + 2) = 34,5 \text{ в;}$$

отсюда э. д. с. эквивалентного режима

$$E' = \sqrt{\frac{E^2(PB) + U_0^2(100 - PB)}{100}} = \sqrt{\frac{34,5^2 \cdot 65 + 65^2(100 - 65)}{100}} = 47,5 \text{ в;}$$

тогда напряжение эквивалентного режима

$$U' = E' - I \Sigma r - 2\Delta U = 47,5 - 242 \cdot 0,025 - 2 = 39,45 \text{ в.}$$

Если генератор имеет параллельное возбуждение, обмотка которого питается от напряжения на зажимах, то, пренебрегая изменениями температуры этой обмотки во время рабочих периодов и пауз, можно считать ток возбуждения пропорциональным напряжению. Тогда ток возбуждения эквивалентного режима  $i'r$ , дающий то же нагревание обмотки, что и при номинальном режиме, должен был бы определяться из равенства

$$i'r = \sqrt{\frac{U^2(PB) + U_0^2(100 - PB)}{100}} = \sqrt{\frac{25^2 \cdot 65 + 65^2(100 - 65)}{100}} = 43,4 \text{ в.}$$

где  $r$  — сопротивление обмотки при рабочей температуре.

Таким образом, при испытании генератора в эквивалентном режиме с напряжением  $U' = 39,45$  в эта обмотка будет недогружена; количество выделяющегося в ней тепла будет меньше того, которое соответствует номинальному режиму, на

$$100 \left( \frac{43,4}{39,45} \right)^2 - 100 \approx 21\%.$$

## 1-10. Измерение температуры

Из числа измерений, производимых при испытании электрических машин на нагревание, важнейшим является измерение температуры изолированных от корпуса обмоток, так как их температура во время работы определяет долговечность изоляции.

Кроме того, измерению подлежит температура стальных сердечников, входящего и выходящего охлаждающего воздуха или иного газа (например водорода), смазочного масла, подшипни-

ков и других трущихся деталей — коллекторов, контактных колец и т. д., воды в случае применения водяного охлаждения, неактивных деталей, могущих подвергаться нагреванию от вихревых токов, и пр.

Из всех существующих методов измерения температуры для основных измерений ГОСТ 183-55 предусматривает следующие четыре (пп. 48—51):

**1. Метод термометра.** Под термином «термометр» в п. 48 понимаются как термометры расширения — ртутные, спиртовые и т. д., — так и всякие другие измерители температуры, если они прикладываются к доступным поверхностям частей собранной машины и, следовательно, дают температуру только поверхности той части и именно в той ее точке, где они приложены. Так как температура внутри той или иной части может заметно отличаться от температуры на ее поверхности, то в тех случаях, когда стандарт наряду с методом термометра допускает применение также какого-либо другого метода измерения, способного учитывать температуру внутри этой части, или ее среднюю температуру, делается различие между предельными допустимыми значениями температуры, измеренными двумя такими способами.

Для улучшения передачи тепла от нагретой поверхности приложенному к ней термометру расширения резервуар последнего следует оборачивать двумя-тремя слоями тонкой оловянной или алюминиевой фольги, стремясь обмять ее так, чтобы она хорошо прилегала к поверхности и чтобы между ее слоями не оставалось воздушных прослоек. Обернутую часть следует прикрывать комком ваты или сухой ткани, плотно привязывая или подпирая распорками к нагретой поверхности.

В тех случаях, когда жидкость термометра находится в переменном или движущемся магнитном поле, стандарт предписывает применять спиртовые термометры, так как в ртути могут индуцироваться вихревые токи, нагревающие ее и тем самым искажающие показания термометра в сторону их увеличения.

Из существующих конструкций термометров наиболее подходящими являются лабораторные термометры со шкальной пластиной внутри оболочки, с пределом до 100—150°С, имеющие диаметр 7—9 мм, длину 200—250 мм и короткую нижнюю часть. Пригодны также палочные термометры, изготовленные из массивной стеклянной трубки диаметром 5,5—7,5 мм с гравированной на ней шкалой; однако последняя обычно недостаточно четка, что делает их применение несколько неудобным. Технические термометры, имеющие диаметр шкальной части 17—20 мм и более или менее длинную нижнюю часть меньшего диаметра (7—10 мм), непригодны для измерения температуры на поверхностях, так как они градуируются при погружении всей нижней части, а потому в этом случае дают

преуменьшенные показания. Зато они подходят для измерения температуры жидкостей и газов, если соблюдено условие погружения всей нижней части в эту среду.

Все эти термометры обычно имеют деления через  $1^\circ \text{C}$ , что в большинстве случаев является вполне достаточным для измерения температуры любых частей машины; но для измерения температуры жидкостей, а иногда и газов, когда требуется особая точность, приходится применять термометры с делениями через  $0,1-0,2^\circ \text{C}$ , снабженные поверочными свидетельствами с поправками.

Если жидкость или газ находятся под давлением, отличающимся от атмосферного, то термометры для измерения их температуры вставляются в запаянные с конца трубки, ввернутые посредством штуцеров или вваренные в соответствующие полости или трубопроводы; для улучшения передачи тепла от стенок трубки к термометру она заполняется маслом или металлическими опилками. При измерении температуры входящего или выходящего воздуха в отверстиях корпуса машины, сообщаящихся с окружающей средой, термометры подвешиваются на растяжках; при этом следует предохранять их от влияния лучистой теплоты, испускаемой находящимися поблизости от них нагретыми частями машины, что особенно существенно при испытании небольших машин, где все расстояния невелики.

Термометры давления, в которых температура измеряется не изменением объема при свободном расширении, а повышением давления в замкнутом объеме, причем измерительным органом является чувствительный манометр, применяются главным образом для измерения температуры жидкостей, в особенности масла в подшипниках; для испытательных станций они мало пригодны ввиду сложности монтажа и настройки.

**2. Метод сопротивления** (п. 49). Этот метод применяется для определения температуры обмоток; он основан на изменении сопротивления металлического проводника в зависимости от его температуры.

Если сопротивление обмотки в практически холодном состоянии при температуре  $\vartheta_x$  обозначить через  $r_x$ , а в нагретом состоянии — через  $r_r$ , то температура ее  $\vartheta_r$  может быть найдена путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} r_x &= r_{15} [1 + \alpha(\vartheta_x - 15)]; \\ r_r &= r_{15} [1 + \alpha(\vartheta_r - 15)]. \end{aligned}$$

Деление второго уравнения на первое дает:

$$\frac{r_r}{r_x} = \frac{1 + \alpha(\vartheta_r - 15)}{1 + \alpha(\vartheta_x - 15)} = \frac{\vartheta_r + \frac{1}{\alpha} - 15}{\vartheta_x + \frac{1}{\alpha} - 15}.$$

Для медных обмоток, как было указано в § 1-5,

$$\alpha = 0,004 = \frac{1}{250},$$

и потому

$$\frac{r_r}{r_x} = \frac{\vartheta_r + 235}{\vartheta_x + 235},$$

откуда

$$\vartheta_r = \frac{r_r}{r_x} (235 + \vartheta_x) - 235 [^{\circ}\text{C}].$$

Для определения  $\vartheta_r$  здесь требуется деление двух близких величин, отличающееся относительно невысокой точностью. Точность вычисления можно значительно повысить, если в числителе дроби правой части прибавить и отнять  $r_x$ :

$$\vartheta_r = \frac{r_r + r_x - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) - 235 = \frac{r_r - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x [^{\circ}\text{C}];$$

тогда превышение температуры  $\Delta\vartheta$  над температурой охлаждающей среды  $\vartheta_0$  будет:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_r - \vartheta_0 = \frac{r_r - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_0 [^{\circ}\text{C}].$$

Особенное удобство приобретают эти формулы в том случае, если за сопротивление обмотки в холодном состоянии принимать его значение, приведенное к  $15^{\circ}\text{C}$ ; тогда

$$\vartheta_r = 250 \frac{r_r - r_{15}}{r_{15}} + 15 [^{\circ}\text{C}],$$

или же

$$\Delta\vartheta = \vartheta_r - \vartheta_0 = 250 \frac{r_r - r_{15}}{r_{15}} + 15 - \vartheta_0 [^{\circ}\text{C}].$$

Все эти формулы могут быть применены и для алюминиевых обмоток, если вместо 235 в них писать 245, а вместо 250 писать 260.

**Пример.** Сопротивление обмотки ротора турбогенератора, измеренное в холодном состоянии при температуре  $\vartheta_x = 24,5^{\circ}\text{C}$ , равно  $r_x = 0,326 \text{ ом}$ ; сопротивление этой же обмотки в конце испытания на нагревание в режиме номинальной нагрузки при температуре входящего в машину газа  $\vartheta_0 = 38,4^{\circ}\text{C}$  достигло величины  $r_r = 0,454 \text{ ом}$ .

Требуется определить превышение температуры обмотки  $\Delta\vartheta$ .

По формуле, предлагаемой ГОСТ 183-55,

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta &= \frac{r_r - r_x}{r_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_0 = \\ &= \frac{0,454 - 0,326}{0,326} (235 + 24,5) + 24,5 - 38,4 = 88,0^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Сопротивление обмотки, приведенное к температуре 15° С, равно:

$$r_{15} = \frac{r_x}{1 + \alpha (\vartheta_x - 15)} = \frac{0,326}{1 + 0,004 (24,5 - 15)} = 0,314 \text{ ом.}$$

Отсюда температура обмотки в нагретом состоянии

$$\vartheta_r = 250 \frac{r_r - r_{15}}{r_{15}} + 15 = 250 \frac{0,454 - 0,314}{0,314} + 15 = 126,4^\circ \text{ С,}$$

и превышение температуры

$$\Delta\vartheta = \vartheta_r - \vartheta_0 = 126,4 - 38,4 = 88,0^\circ \text{ С.}$$

Таким образом, результаты вычисления превышения температуры обоими способами в точности совпадают.

Какими бы точными приборами ни было измерено сопротивление обмотки в холодном состоянии, не рекомендуется пользоваться им для определения температуры обмотки по сопротивлению, измеренному в нагретом состоянии другими приборами, или на других пределах, или в другой схеме. Напротив, при применении одних и тех же приборов, хотя бы даже относительно невысокой точности, результат измерения получается достаточно правильным, поскольку он зависит не от самих величин измеренных сопротивлений, но от их отношения, а погрешность измерения сопротивления как в холодном, так и в нагретом состоянии примерно одна и та же. Поэтому сопротивления обмоток, температура которых подлежит определению, во всех случаях применения этого метода должны быть измерены в холодном состоянии теми приборами, которыми они будут измеряться в нагретом состоянии в процессе испытания, и притом примерно с теми же значениями токов; это не всегда легко выполнить, не подвергаясь риску нагреть обмотки в процессе измерения. Однако не следует все же переоценивать нагревание обмотки при измерении сопротивления. Если предположить даже, что нагревание обмотки измерительным током происходит адиабатически, т. е. что все тепло, выделяемое в обмотке, идет на повышение температуры ее металла, то, как показывает расчет, при обычно применяемых плотностях тока скорость повышения температуры настолько невелика, что вполне позволяет произвести измерение сопротивления без существенной ошибки.

Действительно, повышение температуры  $\Delta\vartheta$  обмотки с сопротивлением  $r$  при нагревании ее током  $i$  за одну секунду равно:

$$\Delta\vartheta = \frac{0,24 i^2 r}{l q c \gamma} [^\circ \text{ С}],$$

где

$l$  [м] — длина проводника обмотки;

$q$  [мм<sup>2</sup>] — его сечение;

$c$  [кал/г·град] — удельная теплоемкость;

$\gamma$  [г/см<sup>3</sup>] — плотность материала проводника.

Подставив вместо сопротивления  $r$  его выражение

$$r = \frac{\rho l}{q} [\text{ом}],$$

где  $\rho [\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}]$  — удельное сопротивление материала проводника, и введя плотность тока

$$j = \frac{i}{q} [\text{а/мм}^2],$$

получим:

$$\Delta \vartheta = \frac{0,24 i^2 \rho l}{l q^2 c \gamma} = \frac{0,24 j^2 \rho}{c \gamma} [\text{град/сек}].$$

Для проводниковой меди можно принять:  $\rho = 0,0175 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ,  $c = 0,093 \text{ кал/г} \cdot ^\circ\text{С}$  и  $\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$ . Тогда

$$\Delta \vartheta = \frac{0,24 \cdot 0,0175 j^2}{0,093 \cdot 8,9} = \frac{j^2}{197} \approx \frac{j^2}{200} [\text{град/сек}].$$

Это выражение является приближенным, так как не учитывает увеличения сопротивления проводника по мере возрастания его температуры; но поскольку здесь может идти речь лишь о небольших повышениях температуры, да и те требуются лишь приближенно оценить, точность его для данной цели может считаться вполне достаточной.

Более точно, с учетом изменения сопротивления при нагреве, можно получить адиабатическое повышение температуры следующим способом: если начальная температура  $\vartheta_0 = +15^\circ\text{С}$ , то повышение температуры  $\Delta \vartheta$  за время  $t$  [сек] определяется из равенства

$$\lg (235 + \vartheta) = 0,0000088 j^2 t + \lg 250;$$

решая это уравнение относительно  $\vartheta$ , далее имеем:

$$\Delta \vartheta = \vartheta - 15 [^\circ\text{С}].$$

Если же начальная температура  $\vartheta_0$  отлична от  $+15^\circ\text{С}$ , то в случае  $\vartheta_0 > +15^\circ\text{С}$  сначала определяется время  $t_0$ , необходимое для нагревания от температуры  $+15^\circ\text{С}$  до температуры  $\vartheta_0$ :

$$t_0 = \frac{\lg (235 + \vartheta_0) - \lg 250}{0,0000088 j^2} [\text{сек}].$$

Далее задача решается по-предыдущему, но для времени  $t' = t + t_0$ , и искомое превышение температуры  $\Delta \vartheta$  определяется из равенства

$$\Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_0 [^\circ\text{С}].$$

Если же  $\vartheta_0 < +15^\circ\text{С}$ , то аналогичным образом сначала определяется время  $t_0$ , потребное на нагревание от температуры  $\vartheta_0$  до  $+15^\circ\text{С}$ , а затем решение проводится для времени  $t' = t - t_0$ .

Заметим, что  $\lg 250 = 2,3979$ .



Для ориентировочных подсчетов адиабатическое повышение температуры медного проводника в тех пределах температуры, с которыми обычно приходится иметь дело в электрических машинах, может определяться по приближенной формуле

$$\Delta\vartheta = \frac{j^2 t}{175} [^\circ\text{C}].$$

**Пример.** Обмотка ротора турбогенератора изготовлена из медного проводника прямоугольного сечения размером  $7 \times 28$  мм. Номинальный ток возбуждения составляет 660 а; при испытании на нагревание искусственным методом не предполагается применять токи возбуждения более  $\frac{2}{3}$  номинального.

Требуется определить, сколько времени может длиться измерение сопротивления обмотки ротора этим током, чтобы температура ее повысилась не более чем на  $1^\circ\text{C}$ .

Плотность тока при измерении

$$j = \frac{660 \cdot 2}{7 \cdot 28 \cdot 3} = 2,25 \text{ а/мм}^2;$$

следовательно, скорость повышения температуры обмотки будет:

$$\Delta\vartheta \approx \frac{j^2}{200} = \frac{2,25^2}{200} = 0,0253 \text{ град/сек};$$

таким образом, на  $1^\circ\text{C}$  она нагреется за время

$$t = \frac{1}{0,0253} = 39,5 \text{ сек},$$

что безусловно достаточно для измерения.

Основной особенностью метода сопротивления является то, что он дает среднюю величину температуры обмотки; отдельные участки обмотки могут иметь при этом температуру, более или менее сильно отличающуюся от средней, но это обстоятельство ускользает от измерения.

Измерение температуры по методу сопротивления в процессе нагревания возможно для всех обмоток, питаемых постоянным током — как неподвижных, так и вращающихся; для первых достаточно, помимо амперметра в цепи питающего их тока, иметь вольтметр, подключаемый непосредственно к зажимам обмотки; если сопротивление последней очень мало, вследствие чего для измерения падения напряжения на ней приходится применять вольтметр с низким пределом измерения, имеющий небольшое сопротивление, рекомендуется припаивать к выводам обмотки те проводники, которые служат для подключения вольтметра.

Для вращающихся обмоток, питаемых через контактные кольца, подключение вольтметра может производиться посредством металлических щеток (пластинчатых, сетчатых и т. п.), укрепленных на прочных изолирующих рукоятках и прижимае-

мых к рабочим поверхностям контактных колец на время измерения. Применение для этой цели щеток, заложенных в нормальные щеткодержатели, изолированные от токоведущих частей, не может быть рекомендовано, так как оно не обеспечивает устойчивого контакта между щетками и кольцами.

Сопротивление обмоток, питаемых переменным током (в том числе и якоре́й машин постоянного тока), может измеряться в нагретом состоянии нормально только после окончания испытания в отключенной и вполне остановленной машине. Но за время, протекающее между моментом отключения и моментом первого измерения, необходимое для остановки машины, подключения измерительной схемы и приведения ее в действие, температура обмотки может измениться, и результат измерения даст неправильное ее значение. Во избежание этого, если измерение температуры возможно не ранее 15—20 сек после отключения машины, ГОСТ 183-55, п. 53, предписывает экстраполировать кривую остывания обмотки на момент отключения следующим образом.

Сопротивление обмотки измеряется несколько раз через произвольные промежутки времени; логарифмы превышений температуры  $\Delta\vartheta$ , вычисленных для каждого измерения, откладываются в зависимости от времени  $t$ , истекшего с момента отключения. Через отложенные значения проводится по линейке прямая (рис. 1-4), которая пересечет ось ординат в точке, дающей искомое превышение температуры обмотки в момент отключения.<sup>1</sup>

Большое упрощение может быть достигнуто таким приемом, нередко применяемым на практике: сопротивление измеряется через небольшие промежутки времени на протяжении периода, не менее чем в два раза превышающего промежуток времени между моментом отключения и моментом первого измерения; зависимость сопротивления от времени, имеющая нормально слегка падающий характер, графически экстраполируется на момент отключения, и по экстраполированному значению вычисляется температура обмотки (рис. 1-5, а).

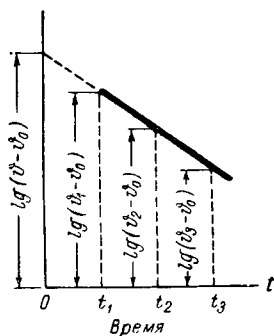


Рис. 1-4. Экстраполяция превышения температуры на момент отключения (извлечение из ГОСТ 183-55, п. 53).

<sup>1</sup> Этот же результат может быть получен, если откладывать превышения температуры вдоль логарифмической оси полулогарифмической координатной бумаги.

В тех случаях, когда вблизи от обмотки, подвергающейся измерению, расположены части, имеющие более высокую температуру, изменение сопротивления принимает аномальный вид (рис. 1-5, б): измеряемое сопротивление вначале не только не падает, но даже возрастает. Подобный случай часто встречается при испытании небольших асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами, обмотки которых нагреваются значительно выше статорных и после отключения начинают повышать температуру последних своей теплоотдачей. В таких случаях стандарт предписывает принимать за температуру обмотки наибольшее из измеренных значений.

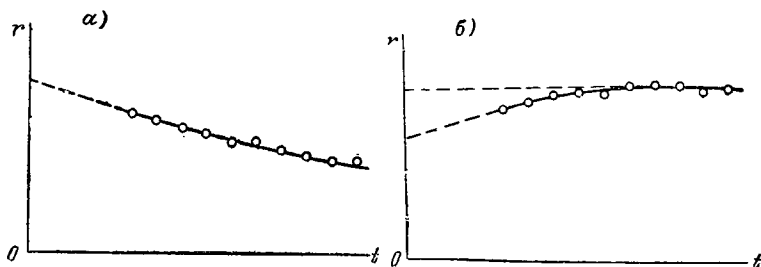


Рис. 1-5. Экстраполяция сопротивления обмотки на момент отключения: а — нормальный случай; б — случай передачи тепла от более нагретой части.

Экстраполяция на момент отключения предполагает, что после этого момента приток тепла в обмотку, подвергаемую измерению, прекращается, а условия ее охлаждения остаются неизменными как до полной остановки, так и после нее.

Однако последнее неверно, так как пока вращение не прекратилось, продолжается циркуляция охлаждающей среды, особенно сильная в первое время после отключения, когда скорость вращения еще не успела значительно понизиться. Чтобы по возможности приблизить условия охлаждения в процессе затормаживания к тем, которые имеют место в неподвижной машине, необходимо одновременно с отключением останавливать и приток охлаждающей среды. В машинах защищенного исполнения это обычно нетрудно сделать посредством закрывания отверстий для входящего воздуха, но в машинах открытого исполнения большей частью бывает невозможно. Если машина имеет замкнутый цикл вентиляции с охлаждением воздуха или иного газа водой, следует прекращать подачу охлаждающей воды.

Указанные обстоятельства заставляют изыскивать методы измерения сопротивлений обмоток во вращающихся машинах. Особенно много усилий было направлено на изыскание методов

измерения сопротивления статорных обмоток крупных синхронных машин при полной скорости вращения, хотя при промышленных испытаниях ГОСТ 183-55 предписывает метод сопротивления для определения температуры таких обмоток только в машинах мощностью не выше 5000 ква или с длиной сердечника менее 1 м.

Из таких методов может быть рекомендован следующий.

По характеристике холостого хода испытываемой синхронной машины тщательно определяется величина отрицательного тока возбуждения, необходимого для практически полного размагничивания машины. Эта величина даже в крупнейших машинах редко превосходит несколько ампер, составляя обычно всего лишь 1—1,5% номинального тока возбуждения, поэтому в качестве источника размагничивающего тока может быть взята переносная батарея аккумуляторов, например типа стартерной.

Для осуществления измерения перед началом испытания должна быть собрана схема рис. 1-6. Между выводами испытываемой машины ИСМ и ее линейным разъединителем ЛР устраивается ответвление, снабженное разъединителем ОР или масляным выключателем на соответствующее напряжение, за которым подключается какой-нибудь генератор постоянного тока ГП, например резервный возбудитель, зарядный или сварочный генератор, с амперметром  $A_1$ . Органы регулирования этого генератора, не показанные на схеме, еще до начала испытания должны быть поставлены в положение, соответствующее желаемому значению измерительного тока.

В цепь разрядного сопротивления РС обмотки возбуждения машины ИСМ (если оно имеется) вводится однополюсный перекидной рубильник ПР, к зажимам которого подключена батарея Б с амперметром  $A_2$  и регулировочным реостатом РР. Последний устанавливается в такое положение, чтобы после замы-

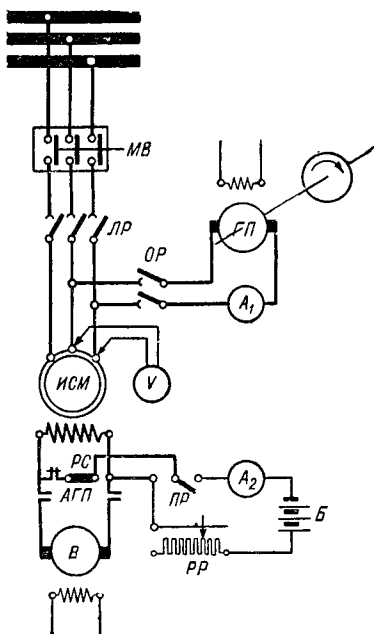


Рис. 1-6. Схема для измерения сопротивления обмотки синхронной машины на ходу.

кания перекидного рубильника *ПР* в цепи возбуждения установлен требуемый размагничивающий ток. Если цепь возбуждения снабжена автоматом гашения поля такой системы, которая не требует применения разрядного сопротивления, то цепь батареи присоединяется к цепи возбуждения через двухполюсный рубильник.

При окончании испытания на нагревание испытываемая машина отключается от нагрузки масляным выключателем *МВ* и линейным разъединителем *ЛР*, и немедленно автомат гашения поля *АГП* гасится ее возбуждение. Через несколько секунд после этого перекидным рубильником *ПР* в цепь возбуждения вводится батарея *Б*, и, если это нужно, величина размагничивающего тока исправляется реостатом *РР*. Затем замыканием разъединителя *ОР* в обмотку статора подается измерительный ток и к выводам машины игольчатыми щупами присоединяется вольтметр *V*.

Величина измерительного тока должна выбираться достаточно большой для того, чтобы можно было применить вольтметр с таким пределом измерения, для которого величина переменного напряжения, могущего остаться вследствие недостаточно точного размагничивания, не представляла бы опасности повреждения.

Достоинством описанного способа является то, что он не требует применения какой-либо специальной аппаратуры. Помимо него, известны и другие способы, например, основанные на подавлении переменного тока от остаточного намагничивания реактивными сопротивлениями в измерительных цепях; однако они не дают особых преимуществ перед описанным, хотя и требуют специальных приспособлений.

Этот способ может быть рекомендован при испытании турбогенераторов, полная остановка которых отнимает слишком много времени даже при условии срыва вакуума в турбине, и тем более при испытании синхронных компенсаторов, для торможения которых нет никаких средств. Но при испытании гидрогенераторов может быть применено торможение подъемными тормозами, резко сокращающее продолжительность остановки; этим удастся производить полную остановку крупнейших машин примерно через 3 мин. после отключения нагрузки, что уже является приемлемым.

Тем не менее и здесь можно рекомендовать измерение сопротивления возможно большими токами по следующей причине. Остывание нагретых частей машины сопровождается сокращением их размеров, которое воспринимается на слух характерным потрескиванием, ясно различимым в тишине. В случае применения малых измерительных токов, а потому и вольтметров с весьма низкими пределами измерения, при каждом та-

ком потрескивании наблюдается резкое подергивание стрелки вольтметра, делающее правильные отсчеты невозможными.

**3. Метод заложенных температурных детекторов (п. 50).** Под температурными детекторами стандарт понимает термопары и термометры сопротивления; они считаются заложенными в том случае, если при изготовлении машины расположены в таких местах, которые в готовой машине являются недоступными.

Согласно требованиям ГОСТ 183-55, температурные детекторы должны закладываться в количестве не менее шести равномерно по окружности машины, причем в таких точках обмотки (в осевом направлении), где ожидаются наиболее высокие значения температуры.

Главной областью применения заложенных температурных детекторов является измерение температуры обмоток статоров машин переменного тока, а также их сердечников. Самые высокие значения температуры в этом случае можно ожидать на тех участках, которые расположены в наибольшем удалении от мест входа в машину струй охлаждающей среды. Детекторы располагаются внутри пазов, причем считается, что они измеряют температуру обмотки только в том случае, если заложены между активными сторонами секций; если же они заложены на дне паза, то их показания принимаются за температуру стали сердечника. Таким образом, в машинах, имеющих однослойные обмотки, заложенные температурные детекторы могут быть применены только для измерения температуры стали сердечника.

Делаются попытки применения заложенных температурных детекторов и для измерения температуры вращающихся частей машины, главным образом якорей машин постоянного тока, как после остановки, так и на ходу. В первом случае детекторы выводятся к доске зажимов, укрепленной на вращающейся части; после остановки к ней быстро присоединяются соответствующие измерительные приборы. Такой способ допускает применение экстраполяции на момент отключения, ничем не отличающейся от описанной при рассмотрении метода сопротивления. Во втором случае детекторы выводятся к системе контактных колец, через которые и соединяются с измерительными приборами. Наибольшую трудность в этом случае представляет обеспечение надежного контакта между кольцами и прилегающими к ним щетками; этот последний должен не только отличаться устойчивым, желательно очень малым сопротивлением, но и быть вполне свободным от контактных электродвижущих сил.

При типовых испытаниях небольших машин, особенно асинхронных двигателей, практикуется закладывание температурных детекторов, главным образом термопар, в обмотку статора при ее наложении. По окончании испытания такие детекторы остаются замурованными в обмотке, а их выводные концы обрезаются и изолируются.

#### 4. Метод встраиваемых температурных детекторов (п. 51).

Этот метод отличается от предыдущего тем, что температурные детекторы (преимущественно термодпары) встраиваются в готовую машину только на время ее испытания, по окончании которого удаляются. Они могут применяться для измерения температуры каких угодно неподвижных частей машины, как активных, так и неактивных, в первую очередь обмоток в лобовых и пазовых частях, а также тела и зубцов сердечников, в таких доступных точках, в которых могут ожидать наиболее высокие значения температуры.

В лобовые части проволочных обмоток статоров машин переменного тока низкого напряжения детекторы вводятся на некоторую глубину путем осторожного раздвигания проводников и надежно привязываются поблизости от этого места шпагатом.

В лобовые части обмоток с жесткими секциями, а также в изолированные катушки полюсов машин постоянного тока детекторы могут быть встроены только путем приклеивания их к наружной поверхности или укрепления бандажами из ленты; в этом случае они измеряют температуру на поверхности, к которой приложены.

В пазовые части обмоток детекторы могут быть встроены посредством укладки под клин, для чего на внутренней его поверхности выдалбливаются соответствующие углубления или канавки.

К неизолированным поверхностям обмоток можно припаивать термодпары, но при условии, что либо эти обмотки заземлены, либо термодпары по всей длине изолированы на полное напряжение цепи, в которую включена обмотка.

В тело и зубцы сердечников температурные детекторы вводятся на глубину не менее 5 мм между отдельными листами, раздвигаемыми посредством шила или острого ножа. Прокладка проводников от детекторов, встраиваемых в зубцы, может осуществляться или через радиальные каналы, или через пазы под клином.

Особое внимание должно быть обращено на измерение температуры окружающей среды, которая, согласно стандарту, для машин с незамкнутым циклом вентиляции является одновременно температурой охлаждающей среды во всех случаях, когда подача вентиляционного воздуха в машину не осуществляется по специальным трубопроводам (п. 52, а).

Эта температура должна измеряться по крайней мере двумя проверенными термометрами, расставленными вокруг испытуемой машины в расстоянии от 1 до 2 м на уровне половины ее высоты, что для машин с горизонтальным валом совпадает с уровнем оси вала.

Термометры эти должны быть защищены от влияния лучистой теплоты, испускаемой как самой машиной, так и какими-либо окружающими источниками тепла, и от случайных потоков

воздуха. Достаточной защитой является погружение их нижних частей в банки из жести, наполненные машинным или трансформаторным маслом и прикрытые сверху жестяными же крышками; термометры вставляются в отверстия этих крышек посредством резиновых или корковых пробок так, чтобы резервуары для ртути не касались дна банок.

Согласно стандарту, за температуру охлаждающего воздуха во время испытания принимается среднее арифметическое из показаний всех таких термометров, взятых через произвольные равные промежутки времени в течение последнего часа испытания.

При охлаждении машины по замкнутому циклу воздухом или водородом или воздухом, подводимым по трубам, за температуру охлаждающей среды принимается ее температура в месте входа в машину (п. 52, б).

### 1-11. Температурные детекторы и индикаторы температуры

Из числа температурных детекторов при испытании электрических машин применяются главным образом термопары и термометры сопротивления.

**Термопары.** Эти температурные детекторы обладают тем преимуществом, что могут быть встроены в наиболее труднодоступные места; поэтому они находят самое широкое применение при испытаниях электрических машин всех размеров.

Нормализованными термопарами для измерения невысоких значений температуры, согласно ГОСТ 6616-53, являются термопары хромель — алюмель и хромель — копель с электродвижущей силой: первая — около 0,04 мВ/град, вторая — около 0,07 мВ/град. Однако эти материалы выпускаются в неизолированном виде, что затрудняет их применение при испытании электрических машин.

Поэтому распространенной в практике испытания электрических машин является термопара медь — константан; ее э. д. с. составляет около 0,04 мВ/град и ее можно изготовлять из обычных изолированных проволок — медной и константановой, диаметр которых по соображениям механической прочности следует брать не ниже 0,3—0,35 мм; проволоки, слегка перевитые, должны быть покрыты общей изолирующей оболочкой в виде хлопчатобумажной, шелковой или стеклянной оплетки, резинового шланга, линоксиновой или хлорвиниловой трубочки и т. д., или обмотаны тонкой и узкой лентой. Для повышения срока службы термопар с оболочками из волокнистых веществ рекомендуется пропитывать последние в разведенном пропиточном лаке.

Спай термопары осуществляется зачисткой изоляции обеих жил на длине 3—5 мм, скручиванием и пропаиванием оловянным припоем без кислоты; практикуемая иногда сварка жил



в пламени вольтовой дуги или автогенной горелки делает спай легко отламывающимся.

Большие затруднения представляет подбор милливольтметра для термопар. Для того чтобы его показания как можно меньше зависели от разницы в сопротивлениях отдельных термопар, могущей происходить от неодинаковости их длин, необходимо, чтобы его сопротивление было по возможности большим; поэтому потребляемая мощность такого прибора должна быть очень невелика, что предъявляет весьма высокие требования к его кернам и подпятникам.

Так как константан представляет сплав, свойства которого могут колебаться в довольно широких пределах, необходимо производить градуировку милливольтметра с термопарами определенной длины, приготовленными из каждой катушки константановой и медной проволоки, для чего следует отбирать не менее двух термопар, по возможности от начала и от конца катушки.

Встречаются милливольтметры, градуированные прямо в градусах температуры, но такая градуировка действительна только с термопарами вполне определенного сорта и сопротивления. Чтобы исключить зависимость показаний термопары от ее длины, с успехом применяется измерение ее электродвижущей силы посредством технического потенциометра, при котором термопара в момент измерения практически не нагружена током. К тому же при известном навыке измерения посредством потенциометра производятся быстрее, так как отпадает необходимость выжидания установления показаний милливольтметра.

Термопара измеряет не температуру того места, в которое заложен ее спай, а превышение этой температуры над температурой противоположного ее конца; последнюю необходимо измерять посредством термометра. Если термопары применены в машине в качестве заложенных температурных детекторов, то около щитка их выводов внутри машины должен быть расположен термометр; тогда проводка от щитка до переключателя, подключающего ту или иную термопару к измерителю, может быть выполнена медными проводниками. Если же такой термометр отсутствует, проводка должна быть осуществлена медными и константановыми проводниками, причем медный проводник служит продолжением медной жилы термопары, а константановый проводник — продолжением константановой жилы; термометр должен быть помещен у переключателя.

Рекомендуется встречное включение в цепь измерителя контрольной термопары, привязанной к нижней части термометра, погруженного в сосуд с маслом (рис. 1-7); при этом измеритель учитывает разность между температурой нагретого конца термопары и температурой, измеряемой термометром.

Переключатель для термопар должен не допускать соедине-

ния между собой двух термопар при переключении с одной на другую, так как при таком соединении могут образовываться контуры, в которых индуктируются э. д. с., опасные для измерителя.

Термопары могут применяться для измерения температуры вращающихся частей машины после остановки в виде медной и константовой ленточек, спаянных серебром и укрепленных на изолирующей рукоятке; под спай подкладывается фетровая подушечка.

Особый успех имеет применение игольчатых термопар для измерения температуры неизолированных металлических поверхностей, например коллекторов и контактных колец. Такая термопара имеет вид двух тонких игольчатых шупов, которые вставляются в поверхность металла. Эти термопары отличаются весьма малой тепловой инерцией, потому что спай осуществляется самим нагретым металлом. Ввиду недостаточной твердости меди для изготовления иглы, способной проколоть слой окисла на поверхности металла, предпочтительно применять для этой цели термопары из более твердых металлов.

Попытки применения термопар для дистанционного измерения температуры вращающихся коллекторов и контактных колец за счет излучаемого тепла нельзя признать удачными, так как предлагаемые для этой цели способы сложны и не отличаются надежностью показаний.

При измерении небольших разностей температуры можно применять последовательное соединение нескольких термопар, однако с учетом того, что соответственно возрастает сопротивление внешней цепи милливольтметра; в случае применения потенциометра это обстоятельство не играет роли.

**Термометры сопротивления.** Эти детекторы обладают по сравнению с термопарами рядом преимуществ и недостатков.

Преимуществами их являются более высокая точность измерений при менее строгих требованиях, предъявляемых к измерительному прибору, и независимость показаний от температуры переключателя; термометры сопротивления измеряют непосредственно температуру нагретого места, а не ее превышение над

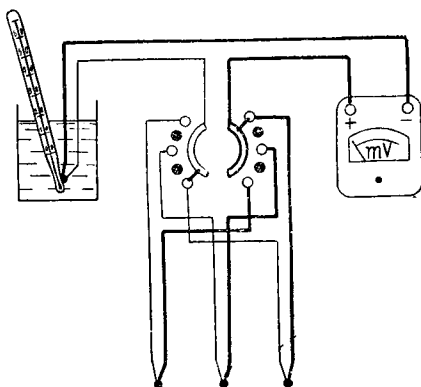


Рис. 1-7. Дифференциальное включение контрольной термопары.

температурой прибора. Главным недостатком следует считать относительно большую сложность настройки измерительной схемы.

Существенным различием термопар и термометров сопротивления является то, что всякие ухудшения контактов для первых ведут к уменьшению показаний, в то время как для вторых — к их увеличению.

В настоящее время в качестве заложенных температурных детекторов применяются почти исключительно термометры сопротивления, причем в наиболее крупных машинах число их нередко достигает нескольких десятков; такое количество является вполне достаточным при проведении типовых испытаний как на заводе-изготовителе, так и на местах установок.

Термометры сопротивления, применяемые в электрических машинах, разделяются на пластинчатые и цилиндрические.

Пластинчатый термометр сопротивления представляет узкую полосу твердого изоляционного материала, на которую намотана тонкая медная изолированная проволока; все вместе покрывается бумажной оболочкой. Такие термометры применяются почти исключительно для укладки в пазы — между слоями обмотки и на дно и, во всяком случае, для измерения температуры твердых тел.

В цилиндрическом термометре сопротивления медная проволока наматывается на металлический стержень в герметически запаянном металлическом футляре; такие термометры пригодны для измерения температуры газов и жидкостей в трубопроводах, для чего вворачиваются в последние посредством штуцеров. Те и другие, согласно предписаниям ГОСТ 6651-53 для класса III, должны иметь сопротивление  $53\text{ ом}$  ( $\pm 0,1\%$ ) при  $0^\circ\text{C}$  и отклонение характеристики не более

$$\Delta\vartheta = \pm (0,3 + 6 \cdot 10^{-3}\vartheta) [^\circ\text{C}].$$

Приборы, предназначенные для применения с термометрами сопротивления, строятся из расчета на то, что сопротивление всех соединительных проводов между ними и термометрами составляет ровно  $5\text{ ом}$ . Поскольку в действительности это сопротивление обычно имеет меньшую величину, в цепь каждого термометра должно вводиться подгоночное сопротивление, равное разности между общей величиной  $5\text{ ом}$  и фактическим сопротивлением соединительных проводов.

При применении термометров сопротивления, встраиваемых в машину на время испытания, сопротивление соединительных проводников должно быть заранее измерено; но при наличии термометров сопротивления, заложенных при изготовлении машины, может быть измерено сопротивление только внешней по отношению к машине части соединительных проводников; по-

этому сопротивление проводников внутри машины должно быть точно указано в документах, прилагаемых к машине.

Необходимость подгонки сопротивлений затрудняет применение термометров сопротивления при испытаниях на стендах завода-поставщика; однако невыполнение этой операции лишает измерение той точности, которая необходима при проведении испытания и вполне доступна при соблюдении указанных требований.

Зачастую вместо применения специальных измерительных приборов практикуется измерение сопротивлений термометров при помощи моста; после вычитания сопротивления проводников из измеренного сопротивления температура определяется по градуировочной таблице, приведенной в ГОСТ 6651-53. Такой способ измерения более кропотлив, но не требует подгонки сопротивлений проводников, и при применении хорошего моста более точен.

Для термометров сопротивления нельзя применять переключатели, подобные вольтметровым; дело в том, что при разрыве цепи в момент переключения с одного термометра на другой подвижная система измерительного прибора будет испытывать сильные толчки тока от источника питания схемы измерения, вредно отзывающиеся на приборе. Поэтому конструкция переключателя должна обеспечивать либо предварительное отключение источника питания при переключениях, либо чрезвычайно быстрый переход из одного положения в другое.

Особую разновидность пластинчатых термометров сопротивления представляют термометры, выполненные наподобие тензометров (см. ниже § 1-15). Такой термометр имеет вид тонкой пластинки слюды, на которую намотана и посредством специального лака подклеена в один слой весьма тонкая (не более 0,05 мм) медная проволока, покрывающая площадку размером обычно не более чем 10×20 мм; поверх проволоки этим же лаком наклеивается с каждой стороны еще листок тонкой бумаги, прикрывающий проволоку. В случае необходимости размеры такого термометра могут быть сделаны еще меньшими, что требует, однако, применения более тонкой проволоки.

Подобные термометры сопротивления, занимая крайне мало места, могут быть не только заложены в пазы, но и приклеены тем же лаком к любым поверхностям. Из-за ограниченности размеров в этих термометрах обычно приходится отступать от стандартного значения сопротивления, что препятствует применению их с нормальными измерительными приборами, предназначенными для этой цели, а малые размеры сечения проволоки заставляют остерегаться нагревания ее измерительным током при применении мостов.

Поэтому такие термометры предпочтительно обслуживать мостовыми схемами, работающими на переменном токе с применением усилительных устройств и настройки на определенную

несущую частоту. Этим достигается то преимущество, что совершенно исключается как влияние наведенных э. д. с., так и действие контактных э. д. с., что позволяет применять подобные термометры для измерения температуры вращающихся частей на ходу. Неизбежные в этом случае скользящие контакты представляют опасность искажения измерений, производимых при помощи постоянного тока, за счет контактных э. д. с.; но эти последние совершенно не влияют на измерение, производимое на переменном токе.

Помимо температурных детекторов в практике испытаний находят применение индикаторы температуры. К ним принадлежат теплочувствительные красители и легкоплавкие металлы.

Под теплочувствительными красителями подразумеваются вещества, способные заметным образом изменять свой цвет при достижении более или менее определенной температуры. Эти красители могут быть двух видов: обратимые, не изменяющие химического состава и восстанавливающие свой первоначальный цвет при остывании, и необратимые, у которых восстановление измененного цвета при остывании не происходит, так как по достижении определенной температуры они изменяют свой состав (обычно теряют кристаллизационную воду). Последние могут быть как однократными, т. е. меняющими цвет при одном значении температуры, так и многократными, у которых наблюдается несколько последовательных изменений цвета при различных значениях температуры.

Теплочувствительные красители применяются в виде красок или карандашей. В первом случае они замешиваются либо на воде, либо на каком-нибудь связующем, не вступающем в реакцию с красителями на всем требуемом интервале температуры. Во втором случае краситель смешивается с воском или церезином, после чего формуется в виде стержней.

Краски наносятся на поверхность, температура которой подлежит определению, либо непосредственно при помощи кисти, либо сначала на полоски бумаги, которые приклеиваются к этой поверхности клеем, нейтральным по отношению к красителю и способным схватываться с этой поверхностью.

Карандаши применяются для непосредственного раскрашивания исследуемых поверхностей. Следует отметить, что они хорошо пристают к чистым поверхностям металлов, но весьма плохо — к поверхностям, покрытым масляными или битумно-масляными лаками.

Недостатком необратимых красителей является то обстоятельство, что изменение их цвета зависит не только от самой температуры, но и от продолжительности ее действия. Краситель, изменяющий цвет при быстром повышении температуры, как только она превзойдет определенный предел, способен так-

же изменить цвет и при продолжительном воздействии заметно более низкой температуры. Это обстоятельство затрудняет пользование теплочувствительными красителями.

На рис. 1-8 представлена типичная зависимость температуры, при которой наступает изменение цвета, от продолжительности ее воздействия.

У обратимых красителей этот недостаток выражен в гораздо меньшей степени; но зато осмотр окрашенных ими поверхностей должен производиться немедленно по достижении заданного температурного состояния объекта, что не всегда бывает возможно.

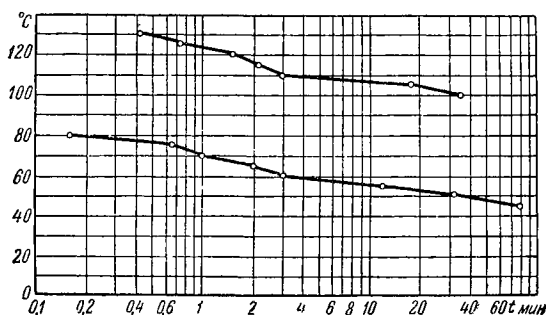


Рис. 1-8. Зависимость температуры изменения цвета теплочувствительного красителя от продолжительности ее воздействия.

Легкоплавкие сплавы отмечают достигнутую температуру со значительно большей надежностью. Они применяются либо в виде небольших табличек правильной формы, закладываемых в места, где предполагается определить температуру, либо в виде заклепок, плотно забиваемых в специально высверленные небольшие отверстия. Если сплавы применяются на вращающейся части, должны быть приняты меры, чтобы они не могли быть вырваны центробежными силами еще до расплавления.

Так как температура плавления сплавов зависит от точности соблюдения рецептуры и от чистоты входящих в них составных частей, она должна проверяться при составлении сплавов и при каждом новом переливании уже составленных сплавов, поскольку при нем может происходить окисление отдельных составляющих.

В табл. 1-1 дается рецептура некоторых сплавов, могущих быть рекомендованными для применения.

Таблица 1-1

| № по пор. | $\vartheta$ [° C] | Висмут<br>Bi | Кадмий<br>Cd | Олово<br>Sn | Свинец<br>Pb | Серебро<br>Ag | Примечания        |
|-----------|-------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|-------------------|
| 1         | 68,0              | 49,5         | 10,1         | 13,1        | 27,3         | —             | „Сплав Вуда“      |
| 2         | 91,5              | 51,7         | 8,1          | —           | 40,2         | —             | Тройная эвтектика |
| 3         | 95,0              | 52,0         | —            | 16,0        | 32,0         | —             | То же             |
| 4         | 102,5             | 53,9         | 20,2         | 25,9        | —            | —             | „                 |
| 5         | 125,0             | 56,5         | —            | —           | 43,5         | —             | Двойная эвтектика |
| 6         | 139               | 58,0         | —            | 42,0        | —            | —             | То же             |
| 7         | 144               | 60,0         | 40,0         | —           | —            | —             | „                 |
| 8         | 176               | —            | 32,5         | 67,5        | —            | —             | „                 |
| 9         | 183               | —            | —            | 63,5        | 36,5         | —             | „                 |
| 10        | 232               | —            | —            | 100,0       | —            | —             | Чистый металл     |
| 11        | 248               | —            | 17,5         | —           | 82,5         | —             | Двойная эвтектика |
| 12        | 271               | 100,0        | —            | —           | —            | —             | Чистый металл     |
| 13        | 304               | —            | —            | —           | 97,5         | 2,5           | Двойная эвтектика |
| 14        | 321               | —            | 100,0        | —           | —            | —             | Чистый металл     |
| 15        | 327               | —            | —            | —           | 100,0        | —             | То же             |

### 1-12. Пределы допускаемых превышений температуры

Испытание машины на нагревание может происходить при различной температуре охлаждающей среды — воздуха или иного газа (водорода и т. п.).

Считается, что превышение температуры не зависит от температуры охлаждающей среды, если последняя не превосходит  $+35^{\circ}\text{C}$ , и поэтому в полученные результаты испытания не требуется введения никаких поправок, которые зависели бы от этой температуры, следовательно, испытание на нагревание может производиться при любой температуре охлаждающей среды, не превосходящей  $+35^{\circ}\text{C}$ . При этом ограничении влияние температуры охлаждающей среды на превышение температуры действительно настолько невелико, что им возможно пренебречь.

Еще в § 1-2 была отмечена принципиальная важность требований, предъявляемых стандартами к нагреванию электрических машин во время работы, как обеспечивающих долговечность машины в ее самой уязвимой части — изоляции, состоящей если не целиком, то в значительной степени из материалов органического происхождения, подверженных перерождению и разрушению под воздействием чрезмерно высокой температуры.

Это перерождение, или, как его называют, старение изоляции происходит тем быстрее, чем выше температура, при которой находится изоляция. Если температура изоляции не превосходит некоторого определенного предела, то вредных изменений в ней не происходит, и она может исправно служить практически неограниченное время.

В зависимости от величины этой предельной температуры, характеризующей нагревостойкость изолирующих материалов, последние разделяются на классы.

Нагревостойкость изолирующих материалов тем выше, чем меньше веществ органического происхождения входит в их состав.

Современная изоляционная техника различает значительное количество изолирующих материалов; но из них ГОСТ 183-55 рассматривает только два наиболее употребительных:

**К л а с с А**, под которым понимаются изолирующие материалы полностью органического происхождения, как то: шелк, бумага, хлопок и т. п., при условии, что они пропитаны или погружены в жидкий диэлектрик, затрудняющий окисляющее действие воздуха и потому задерживающий старение, а также пластические массы с органическим наполнением и состав, именуемый эмалью, который применяется для покрытия проводников (приложение, п. 34).

**К л а с с В**, в который входят изолирующие материалы неорганического происхождения, такие, как слюда, асбест, стеклянное волокно и т. п., с добавлением связующих веществ органического происхождения, а также изолирующих материалов класса А, примененных с целью крепления, при условии, что общее содержание органических веществ не превосходит 50% по весу (приложение, п. 35).

Суждение о температуре, которую могут принимать различные части машины, составляется путем определения превышения температуры этих частей при испытании на нагревание. Но так как определение превышения температуры может производиться различными методами, дающими неравноценные результаты, то и установление предельных допустимых превышений температуры должно производиться с учетом методов их определения.

При рассмотрении различных методов измерения температуры в § 1-10 было выяснено, что метод сопротивления дает среднюю температуру обмотки, отдельные участки которой могут быть нагреты выше этого среднего значения; метод заложенных температурных детекторов должен давать значения, более близкие к наибольшим, а метод термометра, — наоборот, к наименьшим значениям.

Поэтому предельные измеренные превышения температуры могут быть допущены при методе заложенных температурных детекторов более высокими, а при методе термометра — более низкими, чем при методе сопротивления.

В приложении II дана извлеченная из ГОСТ 183-55, п. 21, таблица предельных допустимых превышений температуры различных частей электрических машин, предназначенных для продолжительного или повторно-кратковременного режима, работающих при температуре охлаждающей среды не выше  $+35^{\circ}\text{C}$



и установленных на высоте не более 1000 м над уровнем моря, с учетом применяемого метода их измерения; никаких допусков к данным этой таблицы не существует. Она составлена для двух основных классов применяемых изолирующих материалов — А и В. Предельные допустимые превышения температуры для изолирующих материалов прочих классов не устанавливаются; они должны оговариваться в стандартах на отдельные виды машин, а при их отсутствии — в технических условиях на эти машины, в зависимости от нагревостойкости применяемых изолирующих материалов.

Для машин с кратковременным номинальным режимом работы к концу рабочего периода могут быть допущены несколько более высокие превышения температуры, так как при непродолжительном действии они не будут вызывать заметно ускоренного старения изоляции. Если такие предельно допустимые превышения температуры не указаны особо в стандартах или технических условиях на соответствующие машины, то они могут быть приняты повышенными против значений, указанных в таблице, на  $15^{\circ}\text{C}$  — при измерении по методу сопротивления и на  $10^{\circ}\text{C}$  — при измерении по методу термометра.

В тех случаях, когда по особенностям установки температура охлаждающей среды может превосходить  $+35^{\circ}\text{C}$ , но не превышает  $+45^{\circ}\text{C}$ , предельные допустимые превышения температуры уменьшаются на величину разности между ожидаемой температурой охлаждающей среды и температурой  $+35^{\circ}\text{C}$ .

Для машин, предназначенных к установке на высоте более 1000 м над уровнем моря, но не свыше 3000 м, предельные допустимые превышения температуры, получаемые при испытании на заводе-поставщике, должны быть уменьшены на  $1^{\circ}\text{C}$  на каждые 200 м сверх 1000 м при условии, что предельная температура охлаждающей среды на месте установки машины остается в пределах  $+35^{\circ}\text{C}$ ; если же последняя может быть понижена на  $1^{\circ}\text{C}$  на каждые 200 м сверх 1000 м, то предельные допустимые превышения температуры могут быть сохранены в соответствии с таблицей. Этим учитывается ухудшение вентиляции из-за понижения плотности воздуха при установке на высоте более 1000 м над уровнем моря.

Если предельная температура охлаждающей среды ожидается ниже  $+35^{\circ}\text{C}$ , то указанные в таблице предельные допустимые превышения температуры для изолирующих материалов класса А остаются без изменения. Для изолирующих материалов других классов, в том числе и для класса В, эти превышения могут быть увеличены в соответствии с разностью между температурой  $+35^{\circ}\text{C}$  и ожидаемой предельной температурой охлаждающей среды, однако это увеличение должно быть не более  $20^{\circ}\text{C}$  для турбогенераторов и гидрогенераторов с длиной сердечника до 2 м, и не более  $10^{\circ}\text{C}$  — для всех прочих машин.

Стандарты на крупные быстроходные синхронные машины, работающие по замкнутому циклу вентиляции, а именно турбогенераторы (ГОСТ 533-51, п. 1) и синхронные компенсаторы (ГОСТ 609-54, п. 13), устанавливают предельную температуру охлаждающей среды  $+40^{\circ}\text{C}$ . При этом предел допустимого превышения температуры для обмотки статора, изолированной материалами класса В, установлен значительно ниже требований таблицы ГОСТ 183-55, а именно  $+65^{\circ}\text{C}$  при измерении по методу заложенных температурных детекторов.

Однако последнее вызывается не столько соображениями старения изоляции, которая могла бы выдерживать и более высокие превышения температуры, сколько необходимостью ограничения возможных при эксплуатации разностей температуры обмотки и сердечника, при которых вследствие неодинакового температурного расширения меди и стали могут возникать механические напряжения в изоляции, вредно отражающиеся на ее сохранности.

Аналогично этому стандарт на гидрогенераторы ГОСТ 5616-50, п. 5, устанавливает предельное допустимое превышение температуры обмотки статора, изолированной материалами класса В, равным  $+70^{\circ}\text{C}$  при предельной допустимой температуре охлаждающей среды  $+35^{\circ}\text{C}$ .

Согласно ГОСТ 183-55, п. 23, предельные допустимые значения температуры частей электрических машин получаются суммированием предельного допустимого для данной части превышения температуры, при указанных в таблице классе изолирующего материала и методе измерения температуры, и предельной допустимой температуры охлаждающей среды.

Из всех частей электрической машины особое положение в отношении нагревания занимают подшипники и подпятники. Потери в них при прочих равных условиях определяются вязкостью смазочных материалов, которая у большинства последних резко падает с увеличением температуры. Поэтому при работе таких узлов имеет место саморегулирование, благодаря которому температура подшипника или подпятника, а также и смазочного материала сравнительно мало зависит от температуры окружающей среды.

По этой причине ГОСТ 183-55, п. 24, непосредственно устанавливает предельную допустимую температуру: для подшипников скольжения  $+80^{\circ}\text{C}$  и для нормальных подшипников качения  $+95^{\circ}\text{C}$ , оговаривая, что для подшипников качения специального исполнения могут допускаться и более высокие предельные значения температуры, устанавливаемые заводом, их изготовляющим.

Для подпятников гидрогенераторов в ГОСТ 5616-50, п. 24, установлена предельная допустимая температура  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Некоторые стандарты (ГОСТ 533-51, ГОСТ 609-54) сверх

того устанавливают еще и предельную допустимую температуру смазочного масла, равную  $+65^{\circ}\text{C}$ .

В заключение необходимо упомянуть о предписаниях стандартов в отношении предельной допустимой температуры охлаждающей воды при применении в электрических машинах водяного охлаждения. Согласно ГОСТ 183-55, п. 25, предельной допустимой температурой охлаждающей воды нормально является температура  $+25^{\circ}\text{C}$ ; так как предельная допустимая температура охлаждающей среды (воздуха или водорода) этим стандартом установлена в  $+35^{\circ}\text{C}$ , то разность температуры охлаждающей среды и температуры воды, поступающей в охладитель, не должна быть более  $10^{\circ}\text{C}$ . Если же по условиям места установки машины указанная температура воды не может быть обеспечена, то заказчик вправе требовать повышения ее до  $+28^{\circ}\text{C}$ , т. е. снижения разности температуры охлаждающей среды и поступающей воды всего лишь до  $7^{\circ}\text{C}$ , что вызывает необходимость в соответствующем увеличении производительности охладителей.

Но на паротурбинных станциях в теплые месяцы и эта температура воды не всегда может быть обеспечена; по этой причине ГОСТ 533-51 и ГОСТ 609-54 допускают увеличение предельной температуры воды еще на  $5^{\circ}\text{C}$ , т. е. соответственно до  $+30$  и  $+33^{\circ}\text{C}$ . Так как при этом разности температуры охлаждающей среды и температуры воды, поступающей в охладители, остаются прежними, т. е. соответственно 10 и  $7^{\circ}\text{C}$ , эти стандарты и вынуждены принять предельную допустимую температуру охлаждающей среды, повышенную на  $5^{\circ}\text{C}$  против требований ГОСТ 183-55, т. е.  $+40^{\circ}\text{C}$ .

### 1-13. Коэффициент полезного действия

Под коэффициентом полезного действия (к.п.д.) любой машины понимается отношение полезной (отдаваемой) активной мощности  $P_2$  к затрачиваемой (подводимой) активной мощности  $P_1$ , выражаемое обычно в процентах:

$$\eta = 100 \frac{P_2}{P_1} [\%].$$

В случае электрического генератора полезной мощностью  $P_2$  является отдаваемая им электрическая мощность, которая легко поддается непосредственному измерению, а затрачиваемой мощностью  $P_1$  — подводимая к нему механическая мощность, плохо поддающаяся непосредственному измерению.

Наоборот, в случае электрического двигателя полезной мощностью  $P_2$  является трудно измеряемая отдаваемая механическая мощность, а затрачиваемой мощностью  $P_1$  — легко измеряемая подводимая электрическая мощность.

При любом преобразовании энергии неизбежны потери различного вида; если обозначить их общую величину через  $\Sigma P$ , то можно представить полезную мощность как разность между затрачиваемой мощностью и суммой потерь:

$$P_2 = P_1 - \Sigma P,$$

или же затрачиваемую мощность как полезную мощность, сложенную с суммой потерь:

$$P_1 = P_2 + \Sigma P;$$

отсюда к. п. д.

$$\eta = 100 \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 100 \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} [\%].$$

В соответствии с двумя приведенными выше выражениями для коэффициента полезного действия ГОСТ 183-55, п. 36, различает два вида методов его определения:

методы непосредственного определения к. п. д., когда производится одновременное измерение как отдаваемой, так и подводимой мощности;

методы косвенного определения к. п. д., когда измерению подвергается либо какая-нибудь одна из этих мощностей и потери, в сумме или порознь, либо только потери, а измерение мощностей вообще не производится.

Второй вид методов в принципе отличается большей точностью, чем первый, при котором к. п. д. рассматривается как отношение двух более или менее близких друг к другу величин, одна из которых, являющаяся механической мощностью, к тому же плохо поддается измерению.

Поэтому методы непосредственного определения к. п. д. могут применяться только в тех случаях, когда он настолько низок, что возможные ошибки измерения, в особенности механической мощности, перестают играть существенную роль.

Кроме того, при них найденное значение к. п. д. зависит от того состояния, в котором находилась машина в момент его определения, в частности, от температуры обмоток, и для одной и той же машины различные опыты могут дать различные значения к. п. д.

По этим причинам стандарт предписывает применение методов первого вида для машин с гарантированным значением к. п. д. не выше 50%.

Потери, возникающие в электрической машине, зависят не только от режима ее работы, но в известной степени и от температуры ее частей. Для возможности сравнения разных машин друг с другом при определении к. п. д. косвенным методом принято относить к. п. д. к некоторой условной температуре, назы-

ваемой расчетной рабочей температурой, равной  $+75^{\circ}\text{C}$  (ГОСТ 183-55, приложение, п. 19).

Таким образом, уже по одному этому к. п. д. является величиной условной, относящейся только к некоторому частному случаю состояния машины.

При определении к. п. д. непосредственными методами даже и это условие не может быть точно удовлетворено; поэтому стандарт требует лишь, чтобы температура всех частей машины была равна рабочей температуре и была указана температура охлаждающей среды.

Каким бы методом ни производилось определение к. п. д., машина при этом должна быть во вполне собранном и совершенно исправном состоянии, в частности не должна иметь вибрации, препятствующей исправной работе, ненормальных шумов и т. п. Подшипники, коллекторы, контактные кольца и щетки на них должны быть вполне приработаны, причем щетки на коллекторах должны находиться в положении, соответствующем номинальному режиму работы, за исключением случаев, оговоренных при рассмотрении определения к. п. д. машин постоянного тока.

Согласно п. 38 стандарта, к потерям машины относятся также потери во вспомогательных устройствах, необходимых для работы машины в номинальном режиме, а именно:

а) потери в регулировочных реостатах, в постоянно включенных нерегулируемых сопротивлениях, в реактивных катушках и т. п.;

б) потери во всех вспомогательных электрических машинах, приводимых от вала испытываемой машины, как то: в возбuditелях, подвозбудителях, пусковых двигателях и т. п.;

в) потери во всех подшипниках, поставляемых с машиной;

г) потери в вентиляторах, масляных и водяных насосах, приводимых от вала испытываемой машины.

Не подлежат учету потери в механических приспособлениях для измерения скорости вращения, в посторонних подшипниках, не входящих в поставку вместе с испытываемой машиной, в вентиляторах, водяных и масляных насосах и прочих механизмах, имеющих самостоятельный привод (в том числе и в возбuditелях).

Особым способом учитываются потери в подпятниках гидрогенераторов с вертикальным валом.

От к. п. д., определяемого одним из упомянутых методов в качестве главного экономического показателя машины для номинальной нагрузки или некоторой ее части и являющегося, как уже было указано, величиной условной, следует отличать действительный к. п. д. машины при произвольной заданной нагрузке и фактической температуре ее частей в момент определения.

Необходимость в определении действительного к. п. д. электрической машины встречается в том случае, когда эта машина является вспомогательной при определении потерь или к. п. д. другой какой-либо машины, сопряженной с ней, как электрической, так и неэлектрической.

Так как при этом требуется наибольшая возможная точность и простота определения действительного к. п. д., в величине его не учитываются все потери, которые могут быть обособлены от измеряемой электрической мощности, потребляемой или отдаваемой данной машиной, как, например, потери на возбуждение от постороннего источника и т. п.

Электрическая машина, для которой заранее определен действительный к. п. д. при различных режимах ее работы, носит название *тарированной* машины. Методы тарировки рассматриваются в дальнейшем для каждого вида машин особо.

ГОСТ 183-55, п. 39, предусматривает следующие три метода непосредственного определения к. п. д.

**1. Метод измерения мощностей, или метод двигателя-генератора.** Этот метод состоит в том, что две одинаковые машины сопрягаются на одном валу, причем одна из них работает двигателем, а другая генератором. Электрическая мощность  $P_{1д}$ , подводимая к двигателю, и электрическая мощность  $P_{2г}$ , отдаваемая генератором, измеряются соответствующими электроизмерительными приборами.

Если обозначить через  $P_{2д} = P_{1г}$  мощность, отдаваемую двигателем и подводимую к генератору, то для к. п. д. двигателя можно написать:

$$\eta_d = 100 \frac{P_{2д}}{P_{1д}} [\%],$$

а для к. п. д. генератора:

$$\eta_g = 100 \frac{P_{2г}}{P_{1г}} [\%].$$

Общий к. п. д., очевидно, равен произведению к. п. д. двигателя на к. п. д. генератора:

$$\eta_{дг} = \eta_d \eta_g = 100 \frac{P_{2д}}{P_{1д}} \cdot \frac{P_{2г}}{P_{1г}} = 100 \frac{P_{2г}}{P_{1д}} [\%].$$

В предположении, что к. п. д. обеих машин примерно одинаков, можно получить его значение из выражения

$$\eta_d = \eta_g = 100 \sqrt{\frac{P_{2г}}{P_{1д}}} [\%].$$

Этот метод пригоден в принципе для машин всех видов, но практически наиболее удобен для машин постоянного тока.

**2. Метод торможения.** Этот метод применяется только для двигателей; он состоит в том, что отдаваемая двигателем механическая мощность определяется как величина, пропорциональная произведению измеренной скорости вращения на вращающий момент, измеренный при помощи тормозного устройства, а подводимая к двигателю электрическая мощность измеряется посредством соответствующих электроизмерительных приборов.

Метод пригоден для двигателей всех видов.

**3. Метод нагрузки.** Этот метод пригоден, как для двигателей, так и для генераторов; он состоит в том, что испытываемая машина сопрягается с тарированной машиной.

В случае испытания двигателя искомый к. п. д. представляется как отношение измеренной электрической мощности  $P_{2г}$ , отдаваемой тарированной машиной в режиме генератора, поделенной на ее известный к. п. д.  $\eta_{г}$ , к измеренной электрической мощности  $P_{1д}$ , подводимой к двигателю:

$$\eta_d = 100 \frac{P_{2г}}{\eta_{г} P_{1д}} [\%].$$

В случае испытания генератора искомый к. п. д. определяется как отношение измеренной электрической мощности  $P_{2г}$ , отдаваемой генератором, к измеренной электрической мощности  $P_{1г}$ , подводимой к тарированной машине в режиме двигателя, умноженной на ее известный к. п. д.  $\eta_{г}$ :

$$\eta_{г} = 100 \frac{P_{2г}}{\eta_{г} P_{1г}} [\%].$$

Данный метод пригоден для двигателей и генераторов всех видов.

Мощность вспомогательной машины — тарированного генератора или тарированного двигателя — не должна существенно превосходить мощность испытываемой машины, так как иначе точность результатов измерения будет очень невысокой; но если так, то к. п. д. тарированной машины не будет существенно отличаться от к. п. д. испытываемой машины, и может оказаться, что также будет не выше 50%. Тем не менее тарировка вспомогательной машины обязательно должна производиться одним из методов косвенного определения к. п. д., описываемых ниже, преимущественно методом отдельных потерь.

Для косвенного определения к. п. д. ГОСТ 183-55 (п. 40) предусматривает два метода:

**1. Метод взаимной нагрузки.** Данный метод состоит в том, что две одинаковые электрические машины сопрягаются на одном валу и работают друг на друга, одна — в режиме двигателя, а другая — в режиме генератора. Мощность  $P$ , необходимая для покрытия потерь в обеих машинах, доставляется либо

электрическим путем, либо механическим, либо тем и другим вместе, и подлежит измерению. При этом должны приниматься меры к тому, чтобы эти потери были равны удвоенной сумме потерь испытываемой машины в заданном режиме при заданной полезной мощности  $P_2$ ; тогда ее к. п. д. будет равен:

$$\eta = 100 \frac{P_1 - 0,5P}{P_1} = 100 \frac{P_2}{P_2 + 0,5P} [\%].$$

Этот метод пригоден главным образом для машин постоянного тока и потому более подробно рассматривается в соответствующей части этой книги. В принципе он пригоден и для синхронных машин, однако осуществление его для них настолько сложно, что практически не применяется.

**2. Метод отдельных потерь.** Этот метод является наиболее точным из всех рассматриваемых и пригоден для электрических машин всех видов; поэтому он подробно рассматривается в дальнейшем в применении к каждому из трех основных видов машин.

Стандарт различает следующие виды отдельных потерь (п. 42):

а) потери в стали  $P_{ст}$  на перемагничивание и вихревые токи;

б) механические потери  $P_{т}$ , т. е. потери на трение всех видов;

в) основные потери в цепях рабочих обмоток машины  $P_{м}$  — потери, вычисленные как сумма произведений квадратов токов на соответствующие сопротивления, измеренные при постоянном токе; зачастую их называют «потерями в меди»;

г) потери в переходных контактах щеток  $P_{щ}$  (если таковые имеются), т. е. потери на преодоление переходного падения напряжения в щеточных контактах;

д) потери на возбуждение  $P_{в}$  (для машин, возбуждаемых постоянным током), — аналогичные по своей сущности основным потерям в цепях рабочих обмоток;

е) добавочные потери  $P_{д}$ , к которым относятся потери всех видов, не учтенные среди перечисленных выше. Это — главным образом потери на вихревые токи в проводниках рабочих обмоток и потери на перемагничивание и вихревые токи на поверхностях сердечников вращающейся и неподвижной частей машины, происходящие от высших гармонических магнитного поля.

Каждый вид потерь определяется отдельно способами, специфическими для каждого вида машин; при этом, как правило, потери в стали и механические потери определяются из опыта холостого хода; основные потери в цепях рабочих обмоток



вычисляются по измеренным значениям сопротивлений обмоток и токам, заданным или определенным из опытов нагрузки (кроме потерь в обмотке ротора асинхронного двигателя, определяемых более сложным путем); потери в переходных контактах щеток вычисляются перемножением передаваемых токов на условную величину переходного падения напряжения; потери на возбуждение подсчитываются по току возбуждения, определяемому из специальных опытов, и сопротивлению обмотки возбуждения, с учетом к. п. д. возбудителя, если он находится на валу возбуждаемой им машины; добавочные потери оцениваются приближенно как определенная доля от электрической мощности (кроме синхронных машин мощностью свыше 100 *кв*а, для которых они определяются из опыта короткого замыкания).

Когда все виды потерь при заданной отдаваемой мощности  $P_2$  известны, к. п. д. вычисляется по формуле

$$\eta = 100 \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{т}} + P_{\text{м}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{в}} + P_{\text{д}}} [\%].$$

Однако в некоторых случаях оказывается более удобным исходить из подводимой мощности  $P_1$ :

$$\eta = 100 \frac{P_1 - P_{\text{ст}} - P_{\text{т}} - P_{\text{м}} - P_{\text{щ}} - P_{\text{в}} - P_{\text{д}}}{P_1} [\%].$$

С точки зрения вычислительной практики наиболее удобным и точным является вычисление к. п. д. по формулам вида

$$\eta = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_1} \right) = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \right) [\%].$$

Преимущество косвенных методов определения к. п. д., в особенности метода отдельных потерь, перед методами непосредственного определения к. п. д. состоит в том, что вероятная относительная ошибка в измерении мощности имеет примерно одинаковый порядок как при непосредственном измерении отдаваемой и подводимой мощностей, так и при измерении отдельных потерь; но так как каждая из последних составляет лишь относительно малую долю отдаваемой или подводимой мощности, то относительная ошибка при определении к. п. д. косвенными методами может быть оценена по крайней мере во столько раз меньшей, чем при определении его непосредственными методами, во сколько раз в среднем измеряемые потери меньше суммы измеряемых подводимой и отдаваемой мощностей.

Если обозначить через  $\delta$  величину относительной ошибки определения каждой из участвующих величин, то наибольшую возможную ошибку при определении к. п. д. непосредственным методом согласно теории ошибок можно будет найти из равенства

$$\delta(\eta') = \pm \delta \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = \pm \delta(P_2) \pm \delta(P_1),$$

а при определении косвенным методом — из равенства

$$\delta(\eta'') = \pm \delta \left( 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \right) = \mp \delta(\Sigma P) \frac{\Sigma P}{P_1}.$$

Отсюда, если положить

$$\delta(P_2) \approx \delta(P_1) \approx \delta(\Sigma P),$$

получаем:

$$\frac{\delta(\eta')}{\delta(\eta'')} \approx \frac{P_1 + P_2}{\Sigma P}.$$

Следовательно, если, например,  $\Sigma P \approx 0,1 P_1$ , то ошибка при определении к. п. д. непосредственным методом в 19 раз больше, чем при косвенном.

## 1-14. Измерение мощности

Измерение мощности на постоянном и переменном токе при испытании электрических машин всех видов является одним из важнейших измерений; от его точности зависит правильность определения такой величины, как коэффициент полезного действия, и ряда других. Между тем большинство ошибок и неточностей в испытаниях приходится именно на случаи неверного измерения мощности, происходящего не столько по вине погрешности измерительных приборов, сколько из-за неправильного их применения.

Измерение мощности на постоянном токе производится посредством вольтметра и амперметра; мощность, выделяемая или поглощаемая объектом измерения, определяется как произведение напряжения на его зажимах на ток в нем.

Для правильности измерения необходимо, чтобы напряжение измерялось в действительности на зажимах объекта и чтобы в его величине не участвовали падения напряжения в проводах, коммутационной и измерительной аппаратуре и т. д., так как ими не всегда можно пренебречь.

Необходимости в применении ваттметров при измерении мощности на постоянном токе не встречается; к тому же пределы измерения ваттметров по току ограничены несколькими десятками, в редких случаях одной — двумя сотнями ампер.

Напротив, при переменном токе мощность не может определяться как произведение напряжения на ток ввиду наличия сдвига фаз между ними.

При измерениях на переменном токе возможны три способа включения измерительных приборов.

**1. Непосредственное включение.** Оно применяется тогда, когда напряжение и ток не выходят из пределов измерения имеющихся в наличии измерительных приборов.

Амперметры и обмотки тока ваттметров включаются непосредственно в цепь измеряемого тока, а вольтметры и обмотки напряжения ваттметров подключаются к зажимам объекта измерения; в случае надобности последовательно с ними включаются необходимые добавочные сопротивления. Очень важно, чтобы добавочное сопротивление в цепи обмотки напряжения

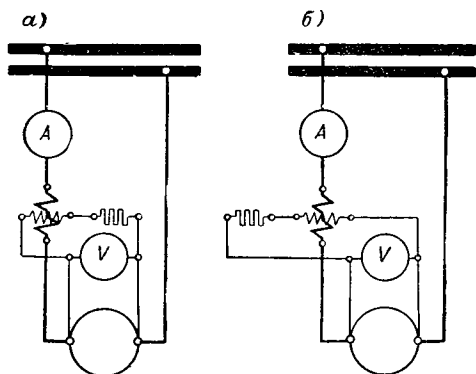


Рис. 1-9. Схема непосредственного измерения мощности в цепях однофазного тока: *а* — правильно, *б* — неправильно.

ваттметра было включено со стороны зажима обмотки напряжения, противоположного тому зажиму, который соединен с обмоткой тока, как показано на рис. 1-9, *а*. При этом между обмотками напряжения и тока существует незначительная разность потенциалов, не превосходящая падения напряжения на самой обмотке напряжения. Напротив, если добавочное сопротивление включено со стороны зажима, соединенного с обмоткой тока (рис. 1-9, *б*), между обмотками ваттметра создается разность потенциалов, равная полному напряжению системы, вследствие чего изоляция между ними может быть пробита.

Если измерительные приборы расположены на изолирующей поверхности и ограждены от прикосновения персонала, и если имеются соответствующие добавочные сопротивления, непосредственное включение может применяться при любых напряжениях, встречающихся в практике испытания электрических машин.

В вольтметре и в обмотке напряжения ваттметра вместе с принадлежащими к ним добавочными сопротивлениями расходует мощность, которую можно определить подсчетом, зная величину сопротивления каждой из этих цепей.

Так как ток, потребляемый обмотками напряжения измерительных приборов переменного тока, довольно велик, то при измерении малых мощностей приходится учитывать мощность, расходуемую в приборах. Эта мощность, или, как ее называют, потери в приборах, вычисляется по формуле

$$P_{\text{пр}} = \frac{U^2}{r_{\text{вт}}} + \frac{U^2}{r_{\text{в}}} [\text{вт}],$$

где  $U$  — измеряемое напряжение;

$r_{\text{вт}}$  — сопротивление обмотки напряжения ваттметра;

$r_{\text{в}}$  — сопротивление вольтметра.

Если объект измерения является приемником, потери в приборах учитываются ваттметром наравне с мощностью, потребляемой объектом, и потому для определения последней должны быть вычтены из показаний ваттметра; наоборот, в случае источника они не учитываются ваттметром и потому должны быть прибавлены к его показаниям.

Сопротивления обмоток приборов обычно указываются на них для всех пределов измерения; если же такое указание отсутствует, их следует определить тщательным измерением.

**Пример.** Производится измерение мощности, поглощаемой приемником однофазного переменного тока при напряжении 525 в и токе около 8 а. Для измерения применены: вольтметр на 130 в с собственным сопротивлением 2167 ом и добавочным сопротивлением, расширяющим предел его измерения до 650 в, и ваттметр на 10 а и 30 в с собственным сопротивлением 1000 ом и добавочным сопротивлением до 600 в, со шкалой на 150 делений. Показания ваттметра составляет 78,8 делений.

Требуется определить действительную мощность, потребляемую приемником.

Цена одного деления ваттметра будет:

$$\frac{600 \cdot 10}{150} = 40 \text{ вт/дел.}$$

Измеренная мощность равна:

$$40 \cdot 78,8 = 3152 \text{ вт.}$$

Сопротивление обмотки напряжения ваттметра вместе с добавочным сопротивлением составляет:

$$r_{\text{вт}} = \frac{600 \cdot 1000}{30} = 20\,000 \text{ ом.}$$

Сопротивление обмотки вольтметра вместе с добавочным сопротивлением равно:

$$r_{\text{в}} = \frac{650 \cdot 2167}{130} = 10\,835 \text{ ом.}$$

Потери в обмотке напряжения ваттметра, как частное от деления квадрата приложенного напряжения на сопротивление цепи этой обмотки, равны:

$$\frac{U^2}{r_{\text{вт}}} = \frac{525^2}{20\,000} = 13,8 \text{ вт.}$$

Аналогично этому потери в цепи вольтметра

$$\frac{U^2}{r_v} = \frac{525^2}{10\,835} = 25,4 \text{ вт.}$$

Таким образом, потери в приборах составляют:

$$P_{\text{пр}} = 13,8 + 25,4 = 39,2 \text{ вт,}$$

и действительная мощность, поглощаемая приемником, равна:

$$3152 - 39,2 = 3112,8 \text{ вт.}$$

В данном случае потери в приборах составляют свыше 1% от измеряемой мощности, следовательно, значительно превышают допустимую погрешность ваттметра высшего класса точности.

**2. Полукокусвенное включение.** Такое включение измерительных приборов применяется в том случае, когда величина тока выходит из пределов измерения приборов. При этом амперметры и обмотки тока ваттметров включаются посредством трансформаторов тока, а вольтметры и обмотки напряжения ваттметров — по-прежнему непосредственно к зажимам объекта измерения (рис. 1-10).

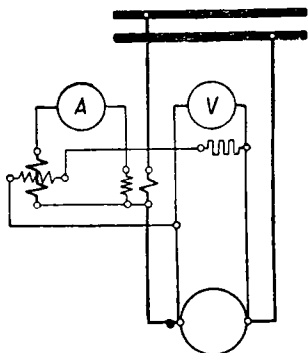


Рис. 1-10. Схема полукокусвенного измерения мощности в цепях однофазного тока.

Согласно требованиям техники безопасности измерительные обмотки и корпуса трансформаторов тока полагается заземлять во избежание появления на них высокого потенциала, опасного для обслуживающего персонала. Но при применении полукокусвенного включения ваттметров этого сделать нельзя, так как тогда окажется, что цепь, в которой производится измерения, отделена от земли только слабой изоляцией между обмотками ваттметра, пробой которой ведет к короткому замыканию цепи на землю через ваттметр.

По этой причине на схеме рис. 1-10 измерительная обмотка трансформатора тока не заземлена, а соединена с линейным проводником, в который введен трансформатор тока. Если корпус трансформатора тока и проводники, соединяющие его с приборами, надежно изолированы от земли, то нет препятствий к применению полукокусвенного включения при любых напряжениях с соблюдением предосторожностей, отмеченных в отношении непосредственного включения.

Недостатком полукокусвенного включения является введение дополнительной погрешности измерения вследствие наличия угловой погрешности трансформаторов тока, которая проявляется

особенно сильно при измерениях в цепях с низкими значениями коэффициента мощности.

На рис. 1-11 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при применении полукосвенной схемы для двух случаев — сильно отстающего и сильно опережающего токов. На

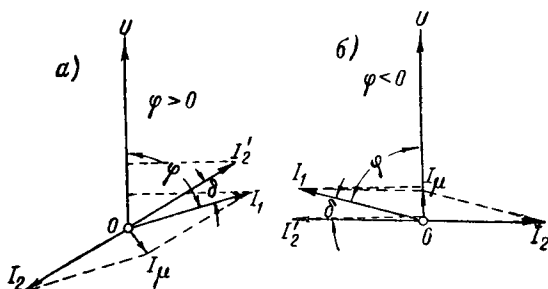


Рис. 1-11. Векторные диаграммы токов и напряжений ваттметра при измерениях с низким коэффициентом мощности: а — при отстающем токе; б — при опережающем токе.

них  $U$  — вектор измеряемого напряжения,  $I_1$  — вектор измеряемого тока,  $I_2$  — вектор тока измерительной обмотки и  $I_\mu$  — вектор намагничивающего тока трансформатора. Как ни мал последний, все же отставание тока  $I_2$  от тока  $I_1$  меньше  $180^\circ$  на величину угловой погрешности  $\delta$ , или приведенный ток  $I_2$  опережает ток  $I_1$  на этот же угол  $\delta$ . Поэтому сдвиг между напряжением  $U$  и приведенным током  $I_2$  при отстающем токе  $I_1$  становится меньше, что преувеличивает показания ваттметра, а при опережающем токе — больше, преуменьшая последние.

Чем больше сдвиг между напряжением  $U$  и током  $I_1$ , тем меньше измеряемая мощность и тем большей становится относительная величина ошибки, вносимой угловой погрешностью.

Таким образом, результат измерения показывает мощность

$$P' = UI_1 \cos(\varphi \mp \delta) = UI_1 \cos \varphi',$$

в то время, как действительное ее значение равно

$$P = UI_1 \cos \varphi = UI_1 \cos(\varphi' \pm \delta),$$

где  $\varphi$  — действительный и  $\varphi'$  — кажущийся сдвиги между напряжением и током. Отсюда

$$P = P' \frac{\cos(\varphi' \pm \delta)}{\cos \varphi'},$$

или, по свойствам тригонометрических функций,

$$P \approx P' \frac{90^\circ - \varphi' \mp \delta}{90^\circ - \varphi'} = P' \left( 1 \mp \frac{\delta}{90^\circ - \varphi'} \right),$$

что и дает возможность исправить результат измерения, если известна угловая погрешность трансформатора тока  $\delta$ .

**Пример.** Производится измерение мощности в цепи однофазного тока полукосвенным способом при сильно отстающем токе. Измеренная мощность по показанию ваттметра составляет  $P' = 7500$  вт при напряжении  $U = 225$  в и токе  $I = 320$  а.

Требуется ввести поправку на угловую погрешность трансформатора тока, составляющую согласно поверочному свидетельству  $\delta = 30'$ .

Кажущееся значение коэффициента мощности

$$\cos \varphi' = \frac{P'}{UI} = \frac{7500}{225 \cdot 320} = 0,104;$$

ему соответствует кажущийся сдвиг  $\varphi' = 84^\circ 03'$ .

Отсюда действительная мощность по точной формуле

$$P = \frac{P' \cos (\varphi' + \delta)}{\cos \varphi'} = 7500 \frac{\cos 84^\circ 33'}{\cos 84^\circ 03'} = 7500 \frac{0,095}{0,104} = 6850 \text{ вт}$$

и по приближенной формуле

$$P = P' \left( 1 - \frac{\delta}{90^\circ - \varphi'} \right) = 7500 \left( 1 - \frac{30'}{90^\circ - 84^\circ 03'} \right) = 6860 \text{ вт.}$$

Таким образом, действительная мощность меньше измеренной на

$$100 \frac{P' - P}{P'} = 100 \frac{7500 - 6850}{7500} = 8,67\%.$$

**3. Косвенное включение.** Это включение применяется тогда, когда и ток, и напряжение выходят из пределов измерения приборов.

Амперметры и обмотки тока ваттметров включаются посредством трансформаторов тока, а вольтметры и обмотки напряжения ваттметров — посредством трансформаторов напряжения (рис. 1-12). В противоположность полукосвенному включению, измерительные обмотки трансформаторов тока и напряжения здесь должны быть заземлены.

Так как косвенное включение применяется главным образом в цепях высокого напряжения, в которых измеряемые мощности достаточно велики, очень мало вероятен случай, когда при нем потребовался бы учет потерь в приборах; но если бы такой случай представился, то к потерям в приборах пришлось бы добавить потери в трансформаторе напряжения, для чего последний должен быть протарирован.

Наличие угловой погрешности трансформаторов напряжения уменьшает ошибку, вносимую угловой погрешностью трансформаторов тока; если бы обе погрешности были равны между со-

бой, эта ошибка была бы исключена, однако обычно угловая погрешность у трансформаторов напряжения в несколько раз меньше, чем у трансформаторов тока.

При измерении мощности в цепях трехфазного тока применяются три способа.

**1. Способ одного ваттметра.** Этот способ пригоден только для тех случаев, когда измеряемая мощность во всех фазах вполне симметрична. Он состоит в том, что измерению подвергается мощность только одной фазы и результат измерения умножается на три. Различаются две разновидности этого способа:

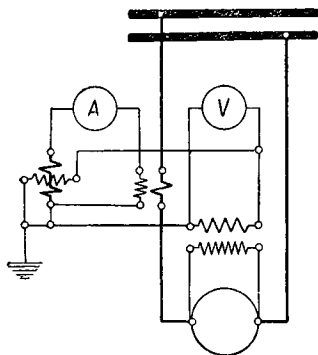


Рис. 1-12. Схема косвенного измерения мощности в цепях однофазного тока.

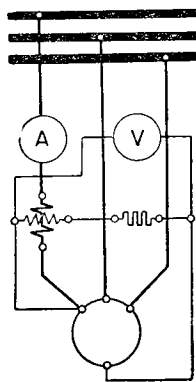


Рис. 1-13. Схема непосредственного измерения мощности в цепях трехфазного тока по способу одного ваттметра.

а) нулевая точка (нейтраль) объекта измерения доступна; обмотка тока ваттметра включается непосредственно или косвенно в один из линейных проводников, а обмотка напряжения, также непосредственно или косвенно,— между тем зажимом объекта, к которому подключен этот же проводник, и нулевой точкой (рис. 1-13);

б) нулевая точка объекта измерения недоступна (или вовсе не существует, как при сопряжении фаз в треугольник). Обмотка тока включается так же, как и в предыдущем случае, а обмотка напряжения подводится к искусственной нулевой точке, созданной посредством трех равных сопротивлений, сопряженных в звезду и подключенных к зажимам объекта; частью одного из этих сопротивлений является сама обмотка



напряжения ваттметра (рис. 1-14, а). При косвенном включении сопротивления подключаются к зажимам измерительных обмоток трансформаторов напряжения (рис. 1-14, б).

В практике испытаний способ одного ваттметра применяется главным образом для измерения мощности вспомогательных машин.

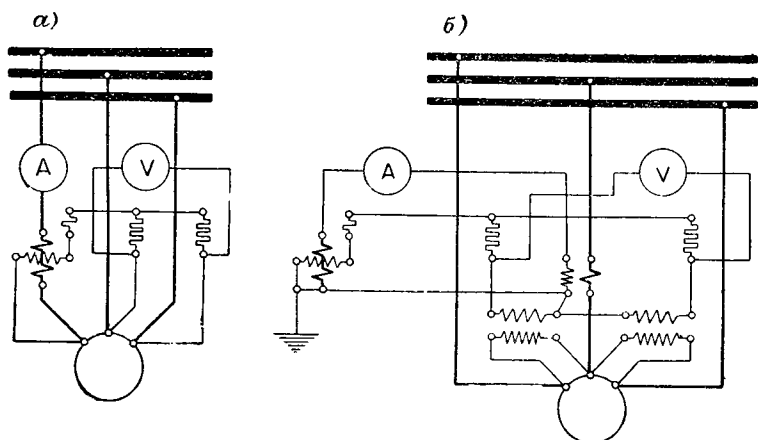


Рис. 1-14. Схемы измерения мощности по способу одного ваттметра с искусственной нулевой точкой: а — непосредственное включение приборов; б — косвенное включение приборов.

**2. Способ трех ваттметров.** Данный способ пригоден для любого распределения мощностей между фазами; он представляет применение предыдущего способа к измерению мощности каждой фазы трехфазной системы. Полная мощность системы при нем равна сумме мощностей, учитываемых всеми тремя ваттметрами. Как и предыдущий, он имеет две разновидности:

а) нулевая точка объекта измерения доступна; тогда обмотки напряжения ваттметров подключаются к ней;

б) нулевая точка объекта измерения недоступна; обмотки напряжения ваттметров сводятся вместе со своими добавочными сопротивлениями в искусственную нулевую точку.

Непременным условием является равенство сопротивлений, сведенных в нулевую точку, если даже ваттметры различны; только при нем показания ваттметров отражают действительное распределение мощностей по фазам. При нормальных промышленных испытаниях этот способ применяется лишь в исключительных случаях, так как для одновременного отсчета требует трех наблюдателей.

**3. Способ двух ваттметров.** Этот способ пригоден также при любом распределении мощностей между фазами, но при непременном условии, что ток в нейтрали равен нулю. Обмотки тока двух ваттметров включаются непосредственно или косвенно в два из трех линейных проводников системы, а обмотки напряжения, также непосредственно или косвенно,— между каждым из двух зажимов объекта измерения, к которым присоединены эти проводники, и третьим зажимом (рис. 1-15).

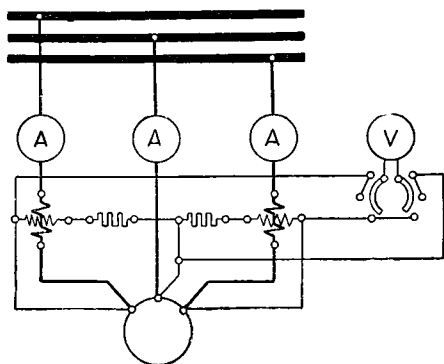


Рис. 1-15. Схема непосредственного измерения мощности по способу двух ваттметров.

В курсах электрических измерений содержится доказательство того, что алгебраическая сумма показаний обоих ваттметров дает правильное значение мощностей всей системы как при симметричном, так и при несимметричном ее распределении между фазами. Из него следует, что показания обоих ваттметров при симметричном распределении мощности бывают равны друг другу по абсолютной величине только в двух случаях: при  $\cos \varphi = 1$  и  $\cos \varphi = 0$ .

На рис. 1-16 тонкими линиями представлены зависимости относительного изменения показаний обоих ваттметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  от коэффициента мощности при неизменных значениях тока и напряжения и при симметричной нагрузке фаз; за единицу приняты их наибольшие возможные показания при этих значениях напряжения и тока. Из рисунка видно, что каждому значению коэффициента мощности соответствует вполне определенное значение отношения меньшего по абсолютной величине показания ваттметра к большему, что дает возможность пользоваться этим отношением для определения соответствующего ему значения коэффициента мощности. На рис. 1-16 зависимость этого

отношения от коэффициента мощности представлена жирной линией, а в приложении VI дана таблица, позволяющая определять коэффициент мощности по отношению показаний ваттметров. Эта таблица пригодна как при отстающем токе, так и при опережающем, и при измерении мощности как поглощаемой приемником, так и выделяемой источником; она составлена для положительных и отрицательных значений отношения через каждые 0,01. Хотя практически никогда не требуется определение значения коэффициента мощности с точностью более

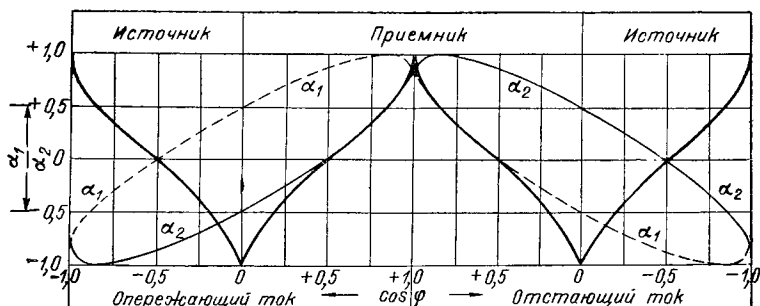


Рис. 1-16. Зависимость изменения отношения показаний двух ваттметров от коэффициента мощности.

чем до третьего знака, в таблице они даны с точностью до четвертого с целью уточнения интерполяции при промежуточных значениях отношения показаний ваттметров.

Вычисление коэффициента мощности произведено по формуле

$$\cos \varphi = \frac{1+x}{2\sqrt{1-x+x^2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(1+x)^3}{1+x^3}},$$

где  $x$  есть отношение меньшего по абсолютной величине показания к большему.

Совпадение значений коэффициента мощности, вычисленных обычным способом по измеренной мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI},$$

и полученных по отношению показаний ваттметров, служит хорошей гарантией правильности измерений мощности, если нагрузка фаз симметрична.

В ряде случаев требуется определение не только активной мощности, но и реактивной, или ее коэффициента  $\sin \varphi$ ; в приложении VII дана таблица для его определения по отношению показаний ваттметров, во всем аналогичная таблице для определения  $\cos \varphi$ .

**Пример.** Производится измерение мощности в цепи трехфазного тока при помощи двух ваттметров со шкалами на 150 делений, включенных на пределы измерения 20 а и 240 в. При напряжении  $U = 210$  в и среднем токе  $I = 18,7$  а получены показания ваттметров:  $\alpha_1 = -25,6$  и  $\alpha_2 = +91,3$  деления.

Требуется определить активную и реактивную мощность и их коэффициенты  $\cos \varphi$  и  $\sin \varphi$ .

Цена деления ваттметров равна:

$$\frac{20 \cdot 240}{150} = 32 \text{ вт/дел.}$$

Измеренная активная мощность

$$P = 32 (91,3 - 25,6) = 2102 \text{ вт.}$$

Коэффициент мощности по подсчету

$$\cos \varphi = \frac{2102}{1,732 \cdot 210 \cdot 18,7} = 0,309.$$

Отношение показаний ваттметров

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = x = \frac{-25,6}{+91,3} = -0,281.$$

По таблицам приложений VI и VII для значений отношения  $-0,28$  и  $-0,29$ , между которыми заключено данное отношение, определяются значения:

$$\begin{array}{lll} \text{при } x = -0,28 & \cos \varphi = 0,3089, & \sin \varphi = 0,9511, \\ \text{при } x = -0,29 & \cos \varphi = 0,3028, & \sin \varphi = 0,9530. \end{array}$$

---


$$\text{разность } +0,0061; \quad \text{разность } -0,0019.$$

Следовательно, для  $x = -0,281$

$$\cos \varphi = 0,3089 - 0,0006 = 0,3083 \approx 0,308,$$

$$\sin \varphi = 0,9511 + 0,0002 = 0,9513 \approx 0,951.$$

Наконец, реактивная мощность

$$\sqrt{3}UI \sin \varphi = 1,732 \cdot 210 \cdot 18,7 \cdot 0,951 = 6470 \text{ ва.}$$

Недостатком способа двух ваттметров является то, что он не дает прямого представления о равномерности распределения мощностей между фазами. Между тем в ряде случаев очень существенно иметь это представление. Поэтому, как правило, следует включать по амперметру в каждый линейный проводник и иметь возможность измерения всех трех линейных напряжений, если и не тремя вольтметрами, то хотя бы при по-

мощи одного вольтметра с вольтметровым переключателем. Симметричность токов и напряжений служит достаточной гарантией симметричности распределения мощностей.

Обеспечение симметричности приложенных напряжений очень важно для получения правильных результатов испытаний, так как ее нарушение может повести к значительному увеличению потерь в объекте испытаний. Между тем при испытаниях мелких машин трехфазного тока, когда приходится применять измерительные приборы на малые токи, которые имеют относительно

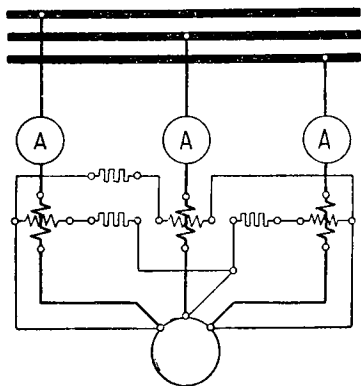


Рис. 1-17. Симметричная схема измерения мощности по способу двух ваттметров.

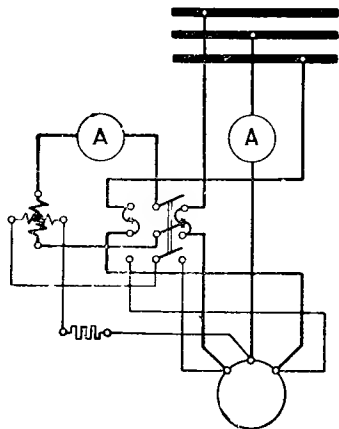


Рис. 1-18. Схема измерения мощности по способу двух ваттметров при помощи одного ваттметра.

высокие сопротивления обмоток тока, нарушение симметричности напряжений может иметь место уже из-за отсутствия ваттметра в одном из линейных проводников. Поэтому в таких случаях можно рекомендовать включение не только трех амперметров, но и трех ваттметров по схеме рис. 1-17.

При симметричном распределении мощностей показание включенного таким образом третьего ваттметра (обмотка тока которого на рис. 1-17 включена в средний проводник), будучи умножено на  $\sqrt{3}$ , дает реактивную мощность системы:

$$\sqrt{3}UI \sin \varphi.$$

Однако при этом возникает опасность пробоя изоляции между обмотками тока и напряжения третьего ваттметра, а потому применение такого включения можно допускать только в том

случае, если напряжение в системе не превосходит 250—300 в; при более высоких напряжениях его обмотка напряжения должна оставаться невключенной.

Несимметричность включения вольтметра между двумя из трех зажимов объекта измерения также может служить причиной нарушения симметричности напряжений; поэтому при измерении очень малых мощностей можно рекомендовать отключать вольтметр на момент отсчета по ваттметрам и амперметрам, если нельзя включить три одинаковых вольтметра (что представляло бы идеальный случай). Общим условием для правильности результатов измерений по способу двух ваттметров является одновременность отсчетов по ним по команде, для чего необходимо наличие двух наблюдателей; одним наблюдателем можно обойтись только тогда, когда режим работы объекта измерения совершенно спокоен.

При недостатке измерительных приборов измерения по способу двух ваттметров могут быть произведены при помощи одного ваттметра; для этой цели применяется специальный переключатель, который вводит обмотку тока ваттметра (а если надо, то и амперметр) поочередно в один из двух линейных проводников и подключает обмотку напряжения ваттметра к соответствующему зажиму объекта измерения (рис. 1-18). Такой переключатель может быть применен и при полукосвенном и косвенном включениях, причем с одинаковым успехом как в первичных, так и в измерительных цепях трансформаторов тока и напряжения. Однако пользование им может быть допущено только при условии, что режим объекта измерения не изменяется за время переключения приборов из одного проводника в другой и что это переключение не вызывает заметного нарушения симметричности напряжений; это сильно ограничивает его применение.

Ваттметры трехфазного тока с двумя измерительными системами на общей оси, включаемыми по способу двух ваттметров, не лишены удобства, так как при них для измерения мощности требуется только один наблюдатель и они сразу дают измеряемую мощность. В особенности удобно применять их для измерений при неустановившихся процессах, а также для работы с вспомогательными машинами.

При измерениях мощности в двигателях трехфазного тока, сопряженных с большими вращающимися массами, как, например, при определении потерь холостого хода и короткого замыкания турбогенератора при приводе от тарированного асинхронного двигателя и т. п., стрелки приборов, в том числе ваттметров, подвержены сильным колебаниям, что крайне затрудняет отсчеты по ним. В таких случаях хорошие результаты может дать применение индукционных счетчиков взамен ваттметров; определяя промежуток времени, потребный на совершение ди-

ском счетчика определенного числа оборотов, например 100 оборотов, нетрудно подсчитать энергию, израсходованную двигателем за это время, и разделив ее на промежуток времени и умножив на к. п. д. двигателя в этом режиме, получить искомые потери. Главное затруднение при этом представляет счет оборотов диска; однако он может быть автоматизирован при помощи фотоэлемента, работающего через усилитель на счетное реле и получающего импульсы от пучка света, проходящего один раз за каждый оборот диска через имеющееся в нем отверстие. Время при этом удобнее всего отсчитывать посредством электрического секундомера, включаемого и отключаемого одновременно с источником света.

### 1-15. Измерение вращающего момента

В ряде случаев, в особенности при испытании двигателей переменного тока, приходится производить измерение развиваемого вращающего момента.

Следует различать три случая измерения вращающего момента:

а) при неподвижной машине может производиться измерение начального пускового вращающего момента;

б) при вращении с неизменной скоростью может производиться измерение вращающего момента при нагрузке и перегрузке в тех пределах, в которых работа машины является устойчивой;

в) при вращении с изменяющейся скоростью может производиться измерение вращающего момента в любом режиме от трогания с места до полной скорости.

Для измерения вращающего момента применяется несколько различных способов.

**1. Способ тормоза.** Такой способ пригоден для измерений в первых двух случаях; он состоит в том, что на вал испытываемого двигателя насаживается какой-либо тормоз: механический, гидравлический или электромагнитный (см. § 2-4). Рычаг тормоза с определенным плечом либо нагружается гирями, либо опирается на платформу весов (лучше всего пружинных), либо, наконец, подвешивается через динамометр.

Во всех случаях тормозной момент  $M$ , создаваемый тормозом, определяется произведением плеча тормоза  $l$  на приложенное к нему усилие  $G$ :

$$M = Gl \text{ [кг} \cdot \text{м]}.$$

При работе с тормозами следует всегда помнить, что правильное значение момента по этой формуле может быть получено только в том случае, когда тормоз сам по себе вполне уравнове-

шен и когда во время отсчета его рычаг не касается ни одного из упоров, обычно устанавливаемых для ограничения его размаха.

Применение тормозов во втором случае имеет то удобство, что позволяет непосредственно определять мощность  $P$ , развиваемую на валу двигателя, по формуле

$$P = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{1000} \cdot Mg = 1,027M \frac{n}{1000} [\text{квт}].$$

Здесь  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  — ускорение силы тяжести и  $n$  — скорость вращения в об/мин.

Если принять плечо тормоза равным

$$l = \frac{1}{1,027} = 0,974 \text{ м},$$

то получится очень удобная для применения формула:

$$P = G \frac{n}{1000} [\text{квт}],$$

т. е. мощность в киловаттах численно равна произведению усилия в килограммах, приложенного к тормозу, на число тысяч оборотов в минуту.

Однако столь длинное плечо может иметь тормоз только довольно значительной мощности — в десятки киловатт; для менее крупных тормозов удобно принять

$$l = 0,487 \text{ м},$$

а для самых мелких

$$l = 0,195 \text{ м},$$

введя в последнюю формулу множителем соответственно 0,5 или 0,2.

При глухом заклинивании вала испытываемой машины в тормозе может производиться измерение начального пускового момента; если не требуется производить измерение момента при вращении двигателя, то вместо тормоза может быть применен один только рычаг, надежно закрепленный на валу.

**2. Способ тарированного генератора.** Этот способ состоит в том, что испытываемый двигатель сопрягается с тарированным генератором, т. е. таким, у которого коэффициент полезного действия заранее тщательно определен для всех возможных режимов. Этот способ пригоден только для второго случая измерения момента.



Если  $P$  — мощность в киловаттах, выделяемая тарированным генератором,  $\eta$  — его коэффициент полезного действия в долях единицы в данном режиме,  $n$  — скорость вращения испытываемого двигателя в оборотах в минуту, то искомый вращающий момент  $M$  в килограмметрах будет равен:

$$M = \frac{60 \cdot 1000 P}{2\pi n \eta q} \approx 975 \frac{P}{n \eta} [\text{кг} \cdot \text{м}].$$

Сопряжение тарированного генератора с испытываемым двигателем должно быть непосредственное (на одном валу), так как в случае какой-либо промежуточной передачи, например ременной, потери в этой последней, трудно поддающиеся учету, внесут неточность в измерение.

**3. Способ ускорения при пуске.** Данный способ пригоден только для третьего случая измерения. Он состоит в том, что двигатель без нагрузки включается под неизменное напряжение; в процессе его разворачивания производится определение зависимости скорости вращения  $n$  от времени  $t$ , истекшего с момента включения:

$$n = f(t).$$

При таком пуске мощность, развиваемая вращающейся частью двигателя, расходуется на увеличение кинетической энергии вращения самой вращающейся части и на покрытие механических потерь, т. е. потерь на трение в подшипниках и других трущихся деталях и вентиляционных потерь, а также добавочных потерь, покрываемых механическим путем.

Если пренебречь этими потерями, что обычно можно сделать без особого ущерба для точности опыта, то, поскольку масса вращающейся части остается неизменной, ускорение вращения, равное производной от скорости вращения по времени, будет пропорционально развиваемому вращающему моменту:

$$M = \frac{\pi}{60} \cdot \frac{GD^2}{2g} \cdot \frac{dn}{dt} \approx \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} [\text{кг} \cdot \text{м}],$$

где  $GD^2$  — маховой момент вращающейся части в  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Таким образом, нужно найти производную по времени от зависимости  $n = f(t)$  и определить ее масштаб в единицах момента. Простейший способ нахождения производной состоит в графическом дифференцировании: в каждой данной точке зависимости  $n = f(t)$  проводится касательная к ней и определяется угловой коэффициент последней. Этот способ крайне кропотлив и очень неточен; поэтому многие усилия были направлены к тому, чтобы получать производную, не прибегая к графическому дифференцированию,

**4. Способ униполярного генератора постоянного тока.** Этот способ представляет одну из таких попыток. Он состоит в том, что с испытываемым двигателем наглухо, посредством жесткой муфты, соединяется униполярный генератор с независимым возбуждением. Напряжение его в любой момент пропорционально скорости вращения; если соединить его с батареей конденсаторов, то ток, заряжающий эту последнюю, будет пропорционален скорости изменения напряжения, или, иными словами, ускорению испытываемого двигателя; этот ток может быть записан, например, при помощи осциллографа. Применение униполярной машины вызвано тем, что у нее отсутствуют пазные и коллекторные пульсации напряжения, которые чрезвычайно усиливались бы в зарядном токе батареи конденсаторов и совершенно затемняли этим основной процесс. Практически наибольшим затруднением при применении этого способа является непостоянство сопротивления щеточного контакта, которое также является источником сильных пульсаций зарядного тока.

**5. Способ магнитоэлектрического дифференциатора.** Такой способ представляет другую попытку в этом же направлении. С испытываемым двигателем сопрягается небольшой генератор постоянного тока с постоянными магнитами, имеющий гладкий якорь без пазов с целью устранения пазных пульсаций напряжения. Напряжение этого генератора подается на подвижную систему механизма, вполне подобного по устройству обыкновенному магнитоэлектрическому измерительному прибору, но значительно увеличенных размеров. Эта система механически связана с системой второго такого же прибора, соединенной с вибратором осциллографа; обе системы находятся под действием уравновешивающих пружин. Отклонение всей такой двойной подвижной системы от положения равновесия пропорционально напряжению генератора; при отклонении в подвижной системе второго прибора индуцируется электродвижущая сила, записываемая вибратором осциллографа и пропорциональная скорости поворота систем, т. е., в конечном итоге, ускорению испытываемого двигателя.

Это устройство достаточно просто в обращении, но обладает тем недостатком, что требует применения вибраторов наивысшей чувствительности; кроме того, оно становится непригодным, если продолжительность пуска велика и если номинальная скорость вращения испытываемого двигателя мала, так как в обоих случаях электродвижущая сила во второй системе получается слишком низкой.

Во всех трех последних способах большое затруднение представляет определение масштаба кривой в единицах вращающего момента. Если начальный пусковой вращающий момент относительно велик, то, будучи измерен, например, по способу тормоза, он может быть принят для масштаба. В противном случае при-

ходится применять такой прием: во время выбега испытываемого двигателя после его отключения создается тормозящий момент известной величины, соизмеримый с величиной момента при пуске, и производится снятие зависимости  $n=f(t)$  или  $\frac{dn}{dt}=f'(t)$  тем же способом, что и при пуске; это и дает возможность определить необходимый масштаб.

**6. Способ торсиометра (крутильного динамометра).** Затруднения, связанные с измерением и записью ускорения вращения, а также с определением масштаба для этой записи, заставляют обращаться к способам, позволяющим измерять вращающий момент непосредственно.

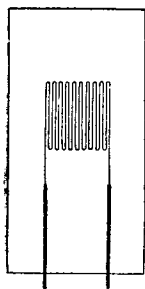


Рис. 1-19. Тенсомер (натуральная величина).

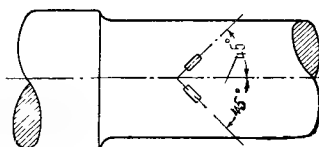


Рис. 1-20. Расположение тенсометров на поверхности скручиваемого вала.

Торсиометр представляет прибор для измерения угла закручивания вала, который может служить мерой вращающего момента, приложенного к этому валу. Сложность этого прибора препятствует его широкому применению при испытании электрических машин, и потому подробности его устройства здесь не рассматриваются.

**7. Способ тенсометров.** Этот способ основан на явлении увеличения электрического сопротивления металлов при растяжении (и уменьшения при сжатии).

Тенсомер представляет полоску бумаги, на которую специальным лаком наклеена тонкая проволока в виде очень плотного зигзага (рис. 1-19). Размеры площади, покрытой зигзагами, обычно не превышают  $10 \times 20$  мм, но в случае надобности могут быть сделаны значительно меньшими.

Тенсомер наклеивается таким же лаком на поверхность, на которой требуется измерять механические напряжения, в направлении действия этих напряжений, и включается, как плечо моста.

Вторым плечом моста является обычно второй тенсометр, имеющий в ненапряженном состоянии точно такое же сопротивление и наклеенный в таком месте, температура которого равна температуре места наклейки первого тенсометра. Назначение этого второго тенсометра состоит в том, чтобы компенсировать изменение сопротивления первого тенсометра от температуры.

При измерении напряжений на поверхностях деталей, подвергаемых растяжению, сжатию или изгибу, второй тенсометр наклеивается на заведомо ненапряженный брусок. Но при измерении напряжений на поверхности скручиваемого цилиндрического вала обычно используется то обстоятельство, что наибольшие напряжения растяжения и сжатия, а потому и соответствующие им деформации, взаимно перпендикулярны и направлены под углами в  $45^\circ$  к оси вала; оба тенсометра наклеиваются на поверхность вала рядом под этими углами (рис. 1-20).

Если измерение момента производится при неподвижной машине, то наклеенные тенсометры непосредственно соединяются с остальной частью схемы моста; но при измерениях, производимых на ходу машины, соединение должно осуществляться посредством скользящих контактов. Это обстоятельство является наиболее крупным препятствием для широкого применения этого способа, так как установка контактных колец на валу испытываемой машины затруднительна. Поэтому предпочтительно производить сопряжение испытываемой машины с вспомогательной машиной через промежуточный валик с заранее оборудованным на нем контактным устройством.

При наличии осевого сверления вала возможно применение отдельного контактного устройства, присоединяемого к концу вала посредством гибкого полого валика, внутри которого пропускаются соединительные проводники.

Практика показывает, что правильно выполненное контактное устройство не вносит заметных искажений в измерения.

В отдельных случаях возможно применение цельных проводников без контактного устройства для измерений при пуске; проводникам дается необходимый запас длины для наворачивания на вал, после чего они обрываются. При этом очень важно, чтобы первым разрывался проводник в цепи источника питания или, еще лучше, измерительного устройства, чтобы оно не могло быть повреждено нарушением равновесия моста при разрыве его плечей.

При измерении момента в неподвижном состоянии питание моста может производиться постоянным током, а само измерение — либо по методу уравновешенного моста путем подбора сопротивлений остальных двух его плечей, либо по методу неуравновешенного моста путем измерения тока в измерительной диагонали моста, что быстрее, но менее точно.

Но при измерении момента на ходу, когда его величина непрерывно и быстро изменяется, необходимо питание моста переменным током по следующим причинам:

а) ток в измерительной диагонали моста слишком слаб, чтобы его можно было непосредственно, без усиления, подавать на вибратор осциллографа;

б) скользящий контакт может служить источником термоэлектродвижущих сил, искажающих измерение;

в) во вращающейся машине возможны различные помехи от наводимых э. д. с., которые при питании схемы переменным током могут быть полностью устранены острой настройкой схемы на частоту питания.

По всем этим причинам питание моста обычно производится от отдельного лампового генератора звуковой частоты.

Градуировка схемы может производиться либо непосредственно по известному моменту, скручивающему данный вал, либо косвенно — на величину деформаций по сравнению с точно таким же тенсометром, наклеенным на образец, нагружаемый так, что его деформация поддается точному учету. В этом отношении предпочтительнее всего пользоваться чистым изгибом.

Если известны механические свойства материала, из которого изготовлен вал, то по величине измеренной деформации на основании законов сопротивления материалов не представляет затруднений определить напряжение  $\tau$  [ $\text{кг}/\text{см}^2$ ] на поверхности скручиваемого вала, откуда затем определяется скручивающий момент:

$$M_k = \frac{\pi d^3 \tau}{1600} [\text{кг} \cdot \text{м}],$$

где  $d$  — диаметр вала в см.

При неподвижном двигателе, заторможенном через конец вала, измеренный момент, скручивающий вал, равен моменту, развиваемому двигателем, уменьшенному на величину момента начального трения в подшипниках, которым в случае подшипников скольжения пренебрегать нельзя.

Когда двигатель пускается вхолостую, его вал не подвергается скручиванию, если не считать относительно ничтожного в нормальных условиях момента трения в подшипниках на ходу. Поэтому для того, чтобы при пуске имело место скручивание вала, необходимо, чтобы он был сопряжен с какой-либо маховой массой. Обычно при испытаниях на заводе-поставщике такой массой служит вращающаяся часть вспомогательной электрической машины.

Если обозначить через  $M_k$  измеренный скручивающий момент, через  $GD_d^2$  — маховой момент вращающейся части двигателя и через  $GD_m^2$  — маховой момент сопряженной с двигателем

массы, то вращающий момент  $M$ , развиваемый двигателем при пуске, будет равен:

$$M = M_k \frac{GD_d^2 + GD_m^2}{GD_m^2} = M_k \left( \frac{GD_d^2}{GD_m^2} + 1 \right).$$

В частности, если испытываемый двигатель сопряжен с другим точно таким же, то

$$GD_d^2 = GD_m^2,$$

и потому

$$M = 2M_k.$$

При вращении с неизменной скоростью, вне зависимости от соотношения маховых моментов вращающихся частей двигателя и приводимой машины, измеренный скручивающий момент равен развиваемому двигателем вращающему моменту.

**Пример.** Образец для градуировки тенсометров имеет вид балки прямоугольного сечения высотой  $h = 0,5$  см, шириной  $b = 4$  см и длиной между опорами  $l = 50$  см. При измерении вращающего момента, передаваемого валом диаметром  $d = 10$  см, соединяющим два одинаковых асинхронных двигателя, один из которых пускается прямым включением, группа из двух тенсометров, наклеенных на этот вал, дала в начале пуска такое же нарушение равновесия моста, какое имеет место при стреле прогиба балки в ее середине  $j = 0,13$  см.

Требуется определить начальный вращающий момент двигателя, если модуль нормальной упругости материала скручиваемого вала равен  $E = 2\,100\,000$  кг/см<sup>2</sup>.

Прежде всего следует определить момент инерции сечения балки; он равен:

$$J = \frac{bh^3}{12} = \frac{4 \cdot 0,5^3}{12} = 0,0417 \text{ см}^4.$$

Момент, который должен изгибать балку данных размеров так, чтобы стрела прогиба в ее середине была равна 0,13 мм, может быть получен из равенства

$$M_6 = \frac{8EJf}{l^2} = \frac{8 \cdot 2\,100\,000 \cdot 0,0417 \cdot 0,13}{50^2} = 36,5 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

Совершенно необязательно, чтобы модуль нормальной упругости материала балки был в действительности тот же самый, что и материала скручиваемого вала; таким образом, этот момент является условным и служит лишь для перехода от измеренных деформаций к напряжениям на поверхности вала.

Напряжение на поверхности балки (при данном модуле нормальной упругости)

$$\tau_6 = \frac{M_6 h}{2J} = \frac{36,5 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,0417} = 219 \text{ кг/см}^2.$$

Такое же значение должно было бы иметь напряжение на поверхности вала, если бы оно воспринималось одним тенсометром; но так как на вал

наклеены два взаимно перпендикулярных тенсометра, один из которых растягивается, а другой сжимается (с одинаковыми напряжениями), то измеренное напряжение на поверхности вала должно быть вдвое меньше:

$$\tau_b = 0,5\tau_\delta = 0,5 \cdot 219 = 109,5 \text{ кг/см}^2;$$

отсюда момент, скручивающий вал,

$$M_k = \frac{\pi d^3 \tau_b}{1600} = \frac{3,14 \cdot 10^3 \cdot 109,5}{1600} = 215 \text{ кг} \cdot \text{м},$$

а момент, развиваемый двигателем,

$$M = 2M_k = 2 \cdot 215 = 430 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

## 1-16. Измерение скорости вращения и скольжения

подавляющее большинство испытаний электрических машин на ходу требует измерения скорости вращения (числа оборотов в минуту). Применяемые способы этого измерения многочисленны и разнообразны, но очень немногие из них обеспечивают точность измерения, не уступающую точности измерения электрических величин.

**1. Способ счетчика оборотов.** Этот способ пригоден в том случае, когда измеряемая скорость вращения вполне устойчива. Он состоит в том, что при помощи секундомера определяется промежуток времени  $T$  в секундах, потребный для совершения валом машины  $N$  оборотов; тогда искомая скорость вращения будет равна:

$$n = \frac{60N}{T} \text{ [об/мин]}.$$

Существуют конструкции счетчиков оборотов, автоматически указывающих среднюю скорость вращения за некоторый небольшой промежуток времени (например 3 сек), называемые тахоскопами.

**2. Способ центробежного тахометра.** Такой способ общеизвестен и находит самое широкое применение; его преимуществом является быстрота измерений и возможность производить их как при неизменной, так и при изменяющейся скорости вращения; главным же недостатком его нужно считать невысокую точность обычных тахометров и трудность их градуировки. Кроме того, способ тахометра не может применяться при испытании очень малых машин, для которых потери на трение внутри механизма тахометра представляют заметную нагрузку. Тем не менее его следует считать основным способом измерения скорости вращения.

**3. Стробоскопический способ с применением тахометра.** Этот способ является разновидностью предыдущего, предназначенной

специально для испытания очень малых машин или для тех случаев, когда вал испытываемой машины недоступен, хотя вращающиеся части находятся на виду. Этот способ состоит в том, что берется небольшой универсальный коллекторный двигатель, желательно с двумя свободными концами вала, к одному из которых присоединяется тахометр, а на другой насаживается зачерненный диск с узкой прорезью. Регулируя скорость вращения двигателя, можно добиться того, что вращающаяся часть объекта испытания, рассматриваемая через прорезь вращающегося диска, будет казаться неподвижной. Отсчет по тахометру, соединенному с двигателем, дает в этот момент искомую скорость вращения или величину, находящуюся с ней в простом отношении. Для усиления эффекта следует снабжать вращающуюся часть ярко заметной меткой, а также освещать ее возможно более сильным источником света, что оказывается полезным даже при дневном освещении.

Применяется также разновидность этого способа, состоящая в том, что вместо диска с прорезью на вал двигателя насаживается прерыватель, подающий импульсы напряжения на сильную газосветную трубку, освещающую объект испытания.

**4. Стробоскопический способ без применения тахометра.** Данный способ состоит в том, что вал испытываемой машины освещается газосветной трубкой, питаемой от лампового генератора регулируемой частоты, вариатор которого градуирован прямо в числах оборотов в минуту. Отсчет по лимбу вариатора берется в тот момент, когда вал испытываемой машины в свете вспышек трубки представляется неподвижным.

При низких скоростях вращения к торцу вала прикрепляется белый диск с несколькими черными секторами, или же на поверхность вала (или муфты, шкива) наклеивается полоса белой бумаги с несколькими равноотстоящими друг от друга черными метками. Отсчет по лимбу вариатора делится при этом на число черных секторов или меток.

**5. Способ частотомера.** Этот способ состоит в том, что с испытываемой машиной сопрягается небольшой генератор переменного тока, напряжение которого подается на вибрационный частотомер. Если  $f$  есть частота, измеряемая частотомером, и  $p$  — число пар полюсов генератора, то искомая скорость вращения

$$n = \frac{60f}{p} \text{ [об/мин]}.$$

При отсутствии соответствующего генератора этот способ может быть видоизменен: на вал испытываемой машины насаживается прерыватель, состоящий из чередующихся между собой проводящих и изолирующих пластин; к его поверхности прижимаются две щетки, расположенные рядом, но изолированные друг от друга, к которым подключается цепь, состоящая из



источника постоянного тока и вибрационного частотомера. При вращении вала проводящие пластины прерывателя поочередно замыкают щетки, тем самым посылая в частотомер толчки тока от источника, под действием которых частотомер дает показания. Скорость вращения определяется по написанной выше формуле, если в ней полагать  $p$  равным числу проводящих пластин прерывателя. Напряжение источника постоянного тока подбирается таким, чтобы частотомер давал хорошо заметные показания.

Преимущество этой разновидности способа состоит не только в легкости ее осуществления, но и в пригодности для измерения сколь угодно малых скоростей вращения, которые требуют лишь увеличения числа проводящих пластин прерывателя до такого, чтобы частота толчков тока оказалась в пределах измерения частотомера.

**6. Способ тахометрического генератора с вольтметром.** Такой способ особенно пригоден в тех случаях, когда скорость вращения изменяется в очень широких пределах. С испытываемой машиной сопрягается небольшая машина постоянного тока с независимым возбуждением. Последнее не должно быть настолько велико, чтобы обмотка возбуждения сильно нагревалась.

Еще лучшие результаты дает применение специальных тахометрических генераторов с постоянными магнитами. Напряжение якоря подается на точный магнитоэлектрический вольтметр, показания которого при неизменном возбуждении пропорциональны скорости вращения. Этот способ весьма точен при условии, что вольтметр хорошо проградуирован на обороты в минуту, для чего достаточно одной точки, при которой скорость вращения измеряется еще каким-нибудь другим способом; от правильности последнего измерения зависит абсолютная точность данного способа.

В качестве тахометрического генератора может быть применена любая машина постоянного тока, в частности возбудитель испытываемой машины, если он имеется.

Этот способ возможен и при тахометрическом генераторе переменного тока с соответствующим вольтметром, однако в этом случае возникают затруднения при измерении относительно малых скоростей вращения, поскольку начало шкалы прибора переменного тока не имеет делений.

В очень многих случаях требуется по возможности более точное измерение сравнительно небольших отклонений скорости вращения от заданного значения; для этого применяется следующий прием: навстречу напряжению тахогенератора постоянного тока  $TGP$  (рис. 1-21) включается (непосредственно или через потенциометр) напряжение батареи свежих гальванических элементов или хорошо заряженных аккумуляторов, компенсирующее большую часть напряжения тахогенератора и контролируемое отдельным вольтметром  $V_2$ . Тогда предел измерения после-

довательно включенного вольтметра  $V_1$  может быть взят во столько раз меньше предела измерения при обычном включении, во сколько предполагаемый интервал изменения скорости вращения меньше наибольшего возможного ее значения.

**7. Способ резонанса.** Этот способ состоит в том, что на испытываемую машину или рядом с ней навешивается либо ставится вибрационный частотомер, язычки которого приходят в резонанс с вибрацией машины. Встречаются вибрационные тахометры, прямо градуированные на числа оборотов в минуту. Способ этот пригоден главным образом для измерения больших скоростей вращения; при его применении следует остерегаться вибраций от машин, работающих по соседству.

Разновидностью измерения скорости вращения является измерение скольжения асинхронных двигателей, под которым понимается выражаемое обычно в процентах отношение разности между скоростью вращения вращающегося поля  $n_0$ , или синхронной скоростью, и действительной скоростью вращения двигателя  $n$  к синхронной скорости:

$$s = 100 \frac{n_0 - n}{n_0} [\%].$$

Так как скольжение при нагрузках, близких к номинальной нагрузке, обычно не превосходит нескольких процентов, определение его посредством измерения скорости вращения  $n$  совершенно неудовлетворительно. Поэтому приходится прибегать к способам, позволяющим определять непосредственно разность  $n_0 - n$ .

**1. Способ амперметра постоянного тока.** Данный способ может быть применен только при испытании двигателей с фазовыми роторами и постоянно налегающими щетками. В одну из фаз цепи ротора вводится шунт магнитоэлектрического амперметра на ток, не меньший, чем амплитуда ожидаемого тока в обмотке ротора; желательно, чтобы прибор имел нуль в середине шкалы. Так как при небольших скольжениях частота тока в обмотке ротора  $f_2$  невелика, то стрелка амперметра совершает качания с этой частотой. Если посредством секундомера определить промежуток времени  $T$  в секундах, потребный на совершение  $N$  полных качаний, то частота их будет равна:

$$f_2 = \frac{N}{T} [\text{гц}].$$

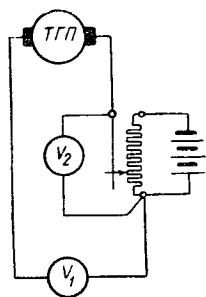


Рис. 1-21. Компенсация напряжения тахометрического генератора.

Так как между частотой  $f_2$  и скольжением  $s$  существует зависимость

$$s = 100 \frac{f_2}{f_1} [\%],$$

где  $f_1$  есть частота тока, создающего вращающееся магнитное поле, то

$$s = 100 \frac{N}{Tf_1} [\%].$$

В частности, если частота  $f_1$  имеет значение 50 *гц*, то

$$s = \frac{2N}{T} [\%].$$

Для практических целей достаточно ограничиться отсчетом  $N = 20$  полных качаний; тогда

$$s = \frac{40}{T} [\%].$$

В приложении VIII дана таблица величин скольжения  $s$  в зависимости от продолжительности  $T$  отсчета 20 полных качаний при частоте питающего тока 50 *гц*.

**2. Способ индукционной катушки.** Этот способ представляет видоизменение предыдущего, пригодное для применения к любым асинхронным двигателям как с фазовыми, так и с короткозамкнутыми роторами. Он состоит в том, что поблизости от конца вала двигателя располагается катушка из большого числа витков с сердечником, соединенная с чувствительным магнитоэлектрическим гальванометром. Потоки рассеяния обмотки ротора индуцируют в катушке электродвижущую силу, приводящую гальванометр в действие. В остальном этот способ не отличается от предыдущего.

Недостатком указанных двух способов является то, что при малых скольжениях, когда токи в обмотке ротора и их поля рассеяния очень слабы, отклонения подвижной системы применяемого прибора становятся настолько малыми, что их отсчет представляет большие затруднения, а при больших скольжениях относительно тяжелая подвижная система прибора перестает успевать реагировать на изменения протекающего по ней тока.

**3. Стробоскопический способ с применением синхронного двигателя.** На вал небольшого двухполюсного реактивного синхронного двигателя, питаемого напряжением той же частоты, что и испытываемая машина, насаживается зачерненный диск с прорезью, через которую рассматривается вращающаяся часть машины. Если бы последняя была тоже двухполюсной и вращалась синхронно, то через прорезь она казалась бы неподвиж-

ной, так как прорезь открывала бы вид на нее всегда в одном и том же положении. Но когда испытываемая машина вращается со скоростью, меньшей синхронной, имея некоторое скольжение, то за каждый полный оборот диска ее ротор успевает повернуться несколько меньше, чем на полный оборот; поэтому рассматриваемый через прорезь, он будет казаться медленно вращающимся в сторону, противоположную действительному направлению вращения. Очевидно, что за один период тока в роторе испытываемой машины ротор должен отстать от синхронно вращающегося поля на один полный оборот; следовательно, если определить время  $T$ , потребное на отставание ротора на  $N$  оборотов, то, применяя предыдущую формулу, можно определить скольжение  $s$ .

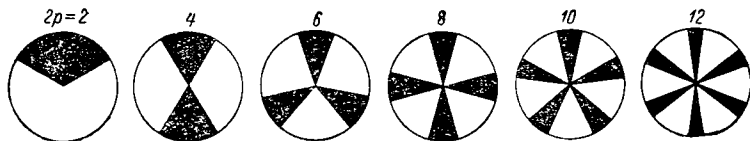


Рис. 1-22. Стробоскопические диски.

Если испытываемая машина имеет  $p$  пар полюсов, то при синхронном вращении ее ротор за каждый оборот диска успевал бы повернуться только на  $\frac{1}{p}$  часть оборота; метка, поставленная на валу испытываемой машины для облегчения счета его кажущихся оборотов, будет при этом представляться умножившейся в  $p$  раз. Для того чтобы ее изображение сохранило прежнюю яркость, следует поставить не одну, а  $p$  одинаковых меток, равномерно распределенных по окружности. Наилучшим образом это достигается путем укрепления на торце вала испытываемого двигателя диска с  $p$  черными секторами на белом фоне, наподобие изображенных на рис. 1-22. При этом следует считать за  $N$  уже не число оборотов, а число прохождений черных секторов мимо какой-либо неподвижной точки.

Если синхронный реактивный двигатель имеет  $p'$  пар полюсов, то в диске следует сделать не одну, а  $p'$  прорезей.

Таким путем можно определять не только положительное скольжение, когда скорость вращения ротора ниже синхронной, но и отрицательное, когда ротор вращается со сверхсинхронной скоростью; но при этом кажущееся вращение изображения будет совпадать по направлению с действительным.

**4. Стробоскопический способ с применением неоновой лампы.** Для получения стробоскопического эффекта можно применить освещение диска на торце вала испытываемой машины светом

неоновой лампы (или любого иного источника свечения газов). Свечение таких ламп начинается тогда, когда приложенное к ним напряжение превосходит определенную величину, именуемую порогом зажигания, и является поляризованным,

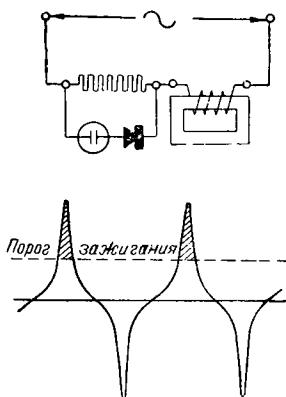


Рис. 1-23. Схема для заострения вспышек неоновой лампы.

т. е. при одном направлении тока светится один электрод, а при противоположном — другой. Следует отдать предпочтение таким конструкциям ламп, при которых имеется возможность освещать объект свечением одной полярности, т. е. использовать только одну вспышку за каждый период; в противном случае в цепь лампы необходимо включить какой-либо вентиль, пропускающий ток только в желаемом направлении.

При питании лампы синусоидальным напряжением продолжительность горения за каждый полупериод относительно велика; поэтому изображение секторов получается расплывчатым. Для придания ему большей резкости следует подавать на лампу напряжение с сильно заостренной формой кривой.

Простейшая схема, посредством которой можно достигнуть необходимого заострения, показана на рис. 1-23; она состоит из реактивной катушки с сильно насыщенным сердечником и соединенного последовательно с нею неиндуктивного сопротивления, к зажимам которого подключена лампа; падения напряжения на сопротивлении и катушке могут быть приняты одного порядка.

Благодаря своей крайней простоте способ с применением неоновой лампы нашел повсеместное применение, не ограничивающееся испытаниями асинхронных двигателей. Так, например, если требуется поддерживать неизменную скорость вращения машины любого вида на уровне одного из возможных значений синхронной скорости при промышленной частоте, т. е.

$$n = \frac{3000}{p} \text{ [об/мин]},$$

где  $p$  в данном случае есть какое угодно целое число, то это может быть достигнуто таким регулированием, при котором диск с  $p$  черными секторами или полоса с  $p$  черными метками в свете неоновой лампы, питаемой этой частотой, кажутся неподвижными.

Подобный прием может быть применен и тогда, когда отношение заданного числа оборотов в минуту к 3000 является несократимой дробью с относительно небольшим знаменателем.

**Пример.** Требуется поддерживать неизменной скоростью вращения машины постоянного тока на уровне  $n = 1285$  об/мин, применяя стробоскопический способ. Отношение заданной скорости вращения к 3000 дает:

$$\frac{1285}{3000} = 0,4283 \approx \frac{3}{7}.$$

За промежуток времени между двумя вспышками лампы вал должен повернуться на  $\frac{3}{7}$  окружности; следовательно, для того чтобы диск казался неподвижным, следует иметь на нем 7 секторов.

Предварительно скорость вращения должна быть проверена по тахометру, так как диск будет казаться неподвижным также и при всякой иной скорости, которая составляет несократимую дробь от 3000 со знаменателем 7, например  $1714 = \frac{4}{7} \cdot 3000$ ;  $2143 = \frac{5}{7} \cdot 3000$  и т. д.

## 1-17. Измерение расхода газов

Хотя программы типовых и контрольных испытаний электрических машин всех видов и не содержат в себе каких-либо опытов по испытанию вентиляции, тем не менее измерение расхода охлаждающего воздуха является операцией, часто выполняемой при испытании электрических машин.

Общим приемом, обычно применяемым при измерении расхода воздуха, является определение средней скорости воздуха в каком-нибудь известном сечении вентиляционного тракта машины. Для этой цели данное сечение разбивается на ряд элементов, в каждом из которых производится измерение скорости воздуха в предположении, что во всех точках данного элемента скорость воздуха одна и та же. Это предположение тем ближе к действительности, чем на большее количество элементов разбито сечение.

Для измерения скорости воздуха применяются следующие способы.

**1. Способ анемометра.** Анемометром (крыльчатым или чашечным) измеряется собственно не скорость, а путь, пройденный им в воздухе; поэтому анемометр должен применяться совместно с секундомером. После выдержки в данной точке, достаточной для того, чтобы скорость вращения колеса анемометра установилась, одновременно включаются, а через определенный промежуток времени останавливаются счетный механизм анемометра и секундомер.

Промежуток времени  $T$ , в течение которого остается включенным счетный механизм анемометра, следует брать не меньше 10—20 сек; однако чрезмерное увеличение его не имеет смысла, так как не повышает заметным образом точности измерения.

Для определения скорости воздуха в данной точке следует взять разность показаний счетного механизма по окончании от-

счета  $S_2$  и до его начала  $S_1$  и разделить на величину промежутка времени  $T$ :

$$v' = \frac{S_2 - S_1}{T} \text{ [м/сек]}.$$

Однако результат нуждается в исправлении по градуировочной кривой или таблице, представляющей зависимость действительной скорости воздуха  $v$  от измеренной  $v'$ . Поскольку такая зависимость зачастую имеет нелинейный характер и отношение этих двух величин может очень значительно отличаться от единицы, исправление следует вносить в каждый произведенный отсчет.

Средняя скорость определяется после проведения всех  $m$  отсчетов по формуле

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \text{ [м/сек]}.$$

При работе с крыльчатым анемометром необходимо следить за тем, чтобы ось вращения крылатки совпадала с направлением струи воздуха, а при работе с чашечным анемометром — чтобы его ось вращения была перпендикулярна струе.

Способ анемометра требует затраты значительного количества времени и не отличается высокой точностью.

**2. Способ простой пневмометрической трубки.** Этот способ, осуществляемый с помощью трубки, известной в литературе под названием трубки Пито, пригоден для измерения скорости воздуха при свободном его выходе из отверстия достаточно длинного прямолинейного канала в атмосферу. К трубке присоединяется при помощи гибкого шланга открытый U-образный манометр, заполненный подкрашенной водой или спиртом.

Если ось сопла трубки направлена строго навстречу струе воздуха в данной точке, то манометр измерит скоростной (динамический) напор  $h_d$  в миллиметрах столба жидкости в манометре. Скорость воздуха определяется после этого по формуле

$$v = \sqrt{\frac{2gh_d\gamma'}{\gamma}} \text{ [м/сек]},$$

где  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  — ускорение силы тяжести;  $\gamma$  — плотность воздуха в  $\text{кг/м}^3$  при данном барометрическом давлении  $H$ , температуре воздуха  $\vartheta$  и его относительной влажности  $\omega$  в процентах;  $\gamma'$  — плотность жидкости в манометре в  $\text{г/см}^3$ .

Сухой воздух при  $0^\circ\text{C}$  и давлении 760 мм рт. ст. имеет плотность  $1,293 \text{ кг/м}^3$ , а водяной пар — плотность, равную 0,622 плотности сухого воздуха, находящегося при тех же условиях.

Отсюда плотность влажного воздуха при температуре  $\vartheta$  [° C], давлении  $H$  [мм рт. ст.] и относительной влажности  $\omega$  [%] будет равна:

$$\gamma = 1,293 \frac{273}{273 + \vartheta} \left( \frac{H - 0,01\omega p}{760} + 0,622 \frac{0,01\omega p}{760} \right) =$$

$$= 1,293 \frac{273}{273 + \vartheta} \left( \frac{H}{760} - 0,00000497\omega p \right) \text{ [кг/м}^3\text{]},$$

где  $p$  — парциальное давление сухого насыщенного водяного пара при данной температуре  $\vartheta$ , выраженное в мм рт. ст., которое может быть взято из табл. 1-2.

Таблица 1-2

| $\vartheta$ [° C] | 0   | 5   | 10  | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   |
|-------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $p$ [мм рт. ст.]  | 4,6 | 6,5 | 9,2 | 12,7 | 17,4 | 23,6 | 31,5 | 41,8 | 54,9 | 71,4 | 92,0 |

При средней температуре 25° C и реально возможных значениях относительной влажности поправка на влажность воздуха не превосходит 1%, поэтому учет ее имеет смысл только при очень точных измерениях; для обычной практики ею можно пренебречь и определять плотность воздуха по упрощенной формуле

$$\gamma = 1,293 \frac{273}{273 + \vartheta} \cdot \frac{H}{760} \text{ [кг/м}^3\text{]}.$$

**Пример.** Измеренный скоростной напор составляет  $h_d = 87$  мм вод. ст.; температура воздуха в точке измерения  $\vartheta = 35^\circ \text{C}$ ; барометрическое давление в момент измерения  $H = 740$  мм рт. ст.; относительная влажность окружающего воздуха  $\omega = 80\%$  при температуре  $\vartheta_0 = 20^\circ \text{C}$ .

Требуется определить скорость воздуха.

Абсолютное содержание водяных паров в воздухе не изменится от того, что температура в месте измерения  $\vartheta$  отличается от температуры окружающей среды  $\vartheta_0$ ; поэтому при определении плотности воздуха парциальное давление насыщенного водяного пара может быть взято из табл. 1-2 применительно к температуре  $\vartheta_0$  при условии, что при этой же температуре определена относительная влажность.

Для температуры  $\vartheta_0 = 20^\circ \text{C}$  парциальное давление насыщенного водяного пара по табл. 1-2 равно  $p = 17,4$  мм рт. ст.; таким образом, плотность воздуха в условиях измерения скоростного напора будет:

$$\gamma = 1,293 \frac{273}{273 + \vartheta} \left( \frac{H - 0,01\omega p}{760} + 0,622 \frac{0,01\omega p}{760} \right) =$$

$$= 1,293 \frac{273}{273 + 35} \left( \frac{740 - 0,01 \cdot 80 \cdot 17,4}{760} + 0,622 \frac{0,01 \cdot 80 \cdot 17,4}{760} \right) =$$

$$= 1,081 \text{ кг/м}^3.$$



Плотность воды при  $20^\circ$   $\gamma = 0,998 \text{ г/см}^3$ ; отсюда искомая скорость воздуха равна:

$$v = \sqrt{\frac{2gh_d\gamma'}{\gamma}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 87 \cdot 0,998}{1,081}} = 39,7 \text{ м/сек.}$$

Если бы плотность воздуха определялась без учета влажности, то

$$\gamma = 1,293 \frac{273}{273 + 9} \cdot \frac{H}{760} = 1,293 \frac{273}{273 + 35} \cdot \frac{740}{760} = 1,115 \text{ кг/м}^3,$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 87 \cdot 0,998}{1,115}} = 39,0 \text{ м/сек.}$$

Если измеряемый напор  $h_d$  меньше 50—75 мм вод. ст., вместо U-образного манометра применяется микроманометр, представляющий манометрическую трубку, которую можно наклонять под различными углами к горизонту. Наклоны подбираются с таким расчетом, чтобы измеряемые напоры можно было получать умножением отсчета по миллиметровой шкале на 2, 5 или 10.

Микроманометр требует тщательной выверки по уровню, входящему в его конструкцию. Зачастую для заполнения микроманометров применяется подкрашенный спирт; тогда плотность спирта должна определяться посредством пикнометра или ареометра.

**3. Способ двойной пневмометрической трубки с полусферической головкой.** Этот способ, осуществляемый с помощью трубки, называемой также трубкой Прандтля, пригоден для измерения скорости воздуха в воздухопроводах, в которых статическое давление может отличаться от атмосферного. Внутренний канал трубки (соединенный с соплом) отбирает при этом полный напор, в то время как наружный канал (соединенный с кольцевой щелью) — один только статический напор; поэтому, если соединить оба канала трубки с двумя ветвями одного и того же U-образного манометра, то его показания будут равны разности полного и статического напоров, т. е. динамическому напору  $h_d$ , по величине которого подсчитывается скорость струи так же, как и в предыдущем способе. Такое включение манометра носит название дифференциального.

При определении плотности газа вместо барометрического давления  $H$  следует принять алгебраическую сумму этого давления и статического напора  $h_c$ . С этой целью, помимо дифференциально включенного манометра, параллельно с ним должны быть подключены открытые манометры для измерения полного и статического напоров.

В отличие от простой трубки, достаточно правильные показания двойной трубки с полусферической головкой могут получаться и тогда, когда ось сопла трубки направлена не вполне точно навстречу струе воздуха; допустимое отклонение может достигать  $16^\circ$ .

4. **Способ электротермоанемометра.** Этот способ, детально разработанный П. В. Чебышевым, состоит в следующем. Вольфрамовая нить длиной 6—7 мм и диаметром 0,03—0,04 мм, укрепленная на конце зонда достаточной длины, вводится в струю воздуха и нагревается постоянным током, контролируемым по точному миллиамперметру. При этом сопротивление нити измеряется при помощи моста. Чем больше скорость воздуха, тем больше будет охлаждаться омываемая им нить, и потому тем меньше будут ее температура и сопротивление при одном и том же нагревающим токе; или, наоборот, тем больший нагревающий ток нужен для поддержания температуры, а вместе с ней и сопротивления нити на заданном уровне. При одной и той же скорости воздуха температура нити будет зависеть от температуры воздуха; чтобы учесть это, не требуется специальных измерителей температуры, так как устройство допускает ее измерение при помощи той же нити, как термометра сопротивления.

Каждый зонд с укрепленной на нем вольфрамовой нитью требует градуировки в специальном устройстве, обеспечивающем точное измерение скорости воздуха.

Достоинствами способа являются: возможность измерения любых скоростей воздуха, относительная быстрота измерений и малая зависимость результатов от положения нити по отношению к направлению струи воздуха. Тонкие и длинные зонды допускают проникновение в очень узкие каналы; кроме того, возможна установка нитей в местах, недоступных после сборки машины, в том числе и во вращающихся частях машины, для чего требуется, конечно, применение контактных колец.

Недостатками способа являются: легкая повреждаемость нитей, особенно пережог их в случае, если они попадают в места с малыми скоростями воздуха, будучи нагреваемы током для измерения больших скоростей. Кроме того, если воздух недостаточно чист, содержащаяся в нем пыль оседает на нити и этим резко ухудшает ее теплоотдачу, в результате чего градуировка нарушается.

Вне зависимости от рода инструмента, применяемого для измерения скорости, при измерении расхода вентиляционного воздуха машин с протяжной вентиляцией применяются два приема — измерение в отверстии свободного выхода в атмосферу и измерение внутри искусственного воздуховода. Первый из них более подходит для измерения весьма больших расходов, как, например, в турбогенераторах, между тем как второй — преимущественно для умеренных.

Воспользоваться для измерения непосредственно выходным отверстием для воздуха в корпусе машины нельзя, потому что в таком отверстии распределение и направление струй воздуха может быть совершенно неопределенным и неправильным. По этой причине к выходному отверстию обязательно должен при-

страиваться патрубок из листовой стали, фанеры или даже картона, обычно прямоугольного сечения, заканчивающийся прямолинейным участком, длина которого составляет не менее, чем 1,5—2-кратный наибольший размер его сечения; желательно, чтобы этот патрубок был направлен вертикально вверх.

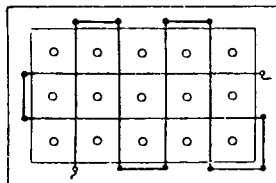


Рис. 1-24. Сетка для измерения расхода воздуха.

В отверстия патрубка натягивается проволоочная сетка, разделяющая его на равные площадки примерно квадратной формы; размер стороны квадрата, в зависимости от сечения патрубка, берется примерно от 100 до 200 мм (рис. 1-24).

Анемометр, пневмометрическая трубка или зонд электротермоанемометра помещаются при измерении поочередно в центр каждого из квадратов.

Если машина имеет два или более отверстий для выхода воздуха, все они соединяются с общим патрубком рукавами, имеющими плавные переходы без резких углов поворота; сечение общего патрубка должно быть не меньше суммы сечений рукавов.

Искусственный воздуховод может пристраиваться и со стороны выхода воздуха; при этом в случае круглого сечения его длина должна быть не менее десятикратного диаметра, а в случае прямоугольного — не менее десятикратного наибольшего размера сечения. Измерение должно производиться в сечении, расположенном на  $\frac{3}{4}$  длины воздуховода, считая по направлению движения воздуха.

При прямоугольном сечении воздуховода в более узкой стороне готовятся отверстия, служащие для ввода внутрь него трубки или зонда и расположенные так, чтобы эти измерители могли помещаться в центрах воображаемых квадратных площадок, на которые разбивается сечение; стержни измерителей размечаются по длине с таким расчетом, чтобы попадать в центры этих квадратов (рис. 1-25).

Пропуск стержня измерителя внутрь воздуховода производится через пробку, достаточно плотно прикрывающую отверстие; остальные отверстия должны быть при этом также заткнуты пробками.

При круглом сечении достаточно двух отверстий, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу. В этом случае могут быть предложены два способа разбивки сечения на концентрические зоны — на зоны равной ширины и на зоны равной площади.

Количество зон равной ширины может быть произвольным, однако редко берется больше шести; диаметры их относятся друг к другу как простые числа натурального ряда, т. е. 1 : 2 : 3 ...

и т. д. Измерение производится по двум взаимно перпендикулярным диаметрам в середине ширины каждой из зон, в том числе и в центральной зоне (рис. 1-26); таким образом, в каждой зоне скорость воздуха измеряется в четырех точках, и средняя скорость для зоны  $v_i$  принимается равной среднему арифметическому из четырех измерений.

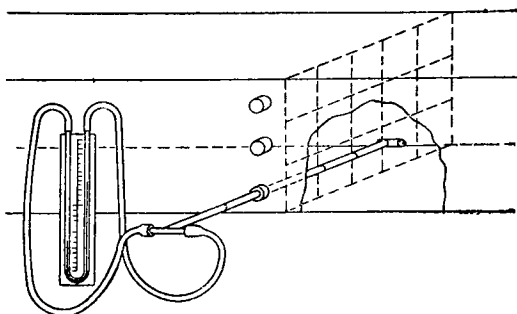


Рис. 1-25. Искусственный воздуховод для измерения расхода воздуха.

Если диаметр воздуховода  $D$  [м] и его сечение разбито на  $m$  зон равной ширины, то площадь центральной зоны равна  $\pi \left(\frac{D}{m}\right)^2$  [м<sup>2</sup>], следующей зоны —  $3\pi \left(\frac{D}{m}\right)^2$  [м<sup>2</sup>], затем  $5\pi \left(\frac{D}{m}\right)^2$  [м<sup>2</sup>] и т. д.; площадь самой внешней зоны будет, очевидно,  $(2m - 1) \pi \left(\frac{D}{m}\right)^2$  [м<sup>2</sup>]. Тогда искомый расход воздуха должен получиться суммированием произведений средних скоростей воздуха каждой из зон на их площади:

$$Q = \sum_{i=1}^m (2i - 1) \pi \left(\frac{D}{m}\right)^2 v_i \text{ [м}^3/\text{сек}].$$

При разбивке сечения на зоны равной площади диаметры зон относятся друг к другу как квадратные корни из чисел натурального ряда:  $1 : \sqrt{2} : \sqrt{3} : \dots$  и т. д. И в этом случае измерение производится по двум взаимно перпендикулярным диаметрам в середине ширины зоны (рис. 1-27), так что для каждой из них получаются значения скорости в четырех точках, и среднее значение скорости для данной зоны  $v_i$  принимается равным среднему арифметическому из четырех измерений. Но так как площади всех зон равны, то средняя скорость по всему сечению может приниматься прямо равной среднему арифметическому из

всех произведенных измерений, а расход — равным произведению сечения воздуховода на эту среднюю скорость.

Если по-прежнему обозначить через  $D$  диаметр воздуховода и через  $m$  — количество зон, то диаметр центральной зоны будет равен  $\frac{D}{\sqrt{m}}$ , следующей за ней  $\frac{\sqrt{2}D}{\sqrt{m}}$ , затем  $\frac{\sqrt{3}D}{\sqrt{m}}$  и т. д.; тогда расстояния точек, в которых нужно производить измерение, от центра сечения будут равны:

$$\frac{D}{4\sqrt{m}}; \frac{D}{4\sqrt{m}}(\sqrt{2} + 1); \frac{D}{4\sqrt{m}}(\sqrt{3} + \sqrt{2}); \dots$$

$$\frac{D}{4\sqrt{m}}(\sqrt{m} + \sqrt{m-1}).$$

Однако целесообразно отсчитывать расстояния не от центра сечения, а от одного из концов диаметра, так как это более

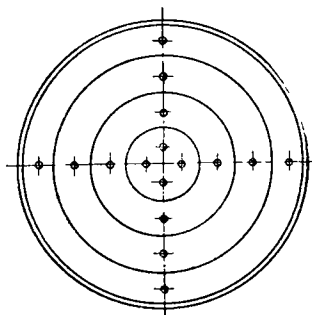


Рис. 1-26. Разбивка круглого сечения воздуховода на зоны равной ширины.

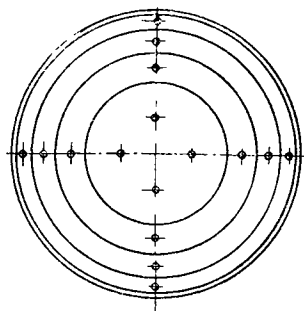


Рис. 1-27. Разбивка круглого сечения воздуховода на зоны равной площади.

удобно для разметки стержня измерителя. Ниже приведены со- считанные таким образом расстояния в процентах от диаметра сечения для различных чисел зон:

а) шесть зон:

2,2; 6,8; 11,9; 17,9; 25,4; 39,8; 60,2; 74,6; 82,1; 88,1; 93,2; 97,8;

б) пять зон:

2,6; 8,3; 14,8; 23,0; 38,8; 61,2; 77,0; 85,2; 91,7; 97,4;

в) четыре зоны:

3,4; 13,2; 19,8; 37,5; 62,5; 80,2; 86,8; 96,6;

г) три зоны:

4,6; 15,2; 35,6; 64,4; 84,8; 95,4;

д) две зоны:

7,3; 32,3; 67,7; 92,7;

е) одна зона:

25,0; 75,0.

При небольших диаметрах воздухопроводов рекомендуется применять трубки малого сечения (с диаметром сопловой части 4—5 мм и менее).

Многочисленными наблюдениями установлено, что при достаточной длине воздуховода круглого сечения среднюю скорость воздуха можно принять равной 0,91 значения, измеренного в центре сечения; это обстоятельство может быть учтено при предварительных измерениях и в случаях, не требующих высокой точности.

Предыдущее изложение показывает, что измерение расхода воздуха посредством измерения скоростей представляет довольно кропотливую операцию. Ниже описывается способ, сразу дающий искомый расход.

**5. Калориметрический способ.** Для этого способа применяется устройство, состоящее из нагревательного элемента в виде сетки, равномерно заполняющей поперечное сечение канала, и двух батарей из одинакового числа термопар, равномерно распределенных по сечению канала, причем одна батарея расположена до нагревательного элемента, а другая после него, на равных расстояниях. Если термопары обеих батарей включены навстречу друг другу и соединены последовательно, то общая э. д. с. обеих батарей даст среднюю разность температуры по всему сечению канала, увеличенную во столько раз, сколько термопар в каждой батарее.

При установившемся режиме вся мощность  $P$  в киловаттах, выделяемая в нагревательном элементе, расходуется на подогревание проходящего через него газа. Если теплоемкость его равна  $C$  [ккал/м<sup>3</sup> · град], а среднее повышение его температуры, измеренное батареями, равно  $\Delta\vartheta$  [°C], то искомый расход будет равен:

$$Q = \frac{0,239P}{C\Delta\vartheta} \text{ [м}^3\text{/сек]},$$

где 0,239 — тепловой эквивалент электрической энергии.

Теплоемкость 1 кг воздуха равна 0,238 ккал.

Для обычной практики учетом влажности воздуха можно пренебречь и определять теплоемкость воздуха по формуле

$$C = 0,307 \frac{273}{273 + \vartheta} \cdot \frac{H}{760} \text{ [ккал/м}^3 \cdot \text{град]}.$$

Заметим, что теплоемкость воздуха по существу должна быть отнесена к его температуре до прохода через нагревательный элемент, если измерение производится на выходе из машины, и после нагревательного элемента, если измерение производится на входе в машину; однако поскольку обычно температура воздуха лишь незначительно повышается при проходе его через нагревательный элемент, вопрос этот не имеет серьезного значения.

**Пример.** Измерение расхода воздуха калориметрическим способом производится на выходе из машины при барометрическом давлении  $H = 740$  мм рт. ст. и температуре  $\vartheta = 57^\circ \text{C}$ .

Требуется определить расход воздуха, если в нагревательном элементе выделяется мощность  $P = 2,37$  квт и разность э. д. с. двух батарей термопар хромель-копель, по  $m = 20$  шт. в каждой, установленных до и после нагревательного элемента, составляет  $\Delta E = 2,51$  мв.

Термопары хромель-копель при малых разностях температуры нагретого и холодного концов имеют э. д. с.  $e = 0,065$  мв/град; отсюда средняя разность температуры, измеряемая ими, будет равна:

$$\Delta \vartheta = \frac{\Delta E}{me} = \frac{2,51}{20 \cdot 0,065} = 1,93^\circ \text{C}.$$

Теплоемкость 1 м<sup>3</sup> воздуха при температуре  $\vartheta$

$$C = 0,307 \frac{273}{273 + \vartheta} \cdot \frac{H}{760} = 0,307 \frac{273}{273 + 57} \cdot \frac{740}{760} = 0,247 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град};$$

отсюда искомый расход воздуха

$$Q = \frac{0,239P}{C\Delta\vartheta} = \frac{0,239 \cdot 2,37}{0,247 \cdot 1,93} = 1,19 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Водород, применяемый для охлаждения крупных турбогенераторов и синхронных компенсаторов, всегда содержит некоторую примесь воздуха; содержание водорода в смеси обычно выражается в объемных отношениях. Так, если говорят, что водород имеет чистоту 95%, это значит, что в смеси водорода и воздуха содержится 95% по объему водорода и 5% по объему воздуха.

Если обозначить через  $q$  содержание водорода в смеси в процентах, а через  $\gamma_{\text{вод}}$  и  $\gamma_{\text{вод}}$  — плотности воздуха и водорода при  $0^\circ \text{C}$  и 760 мм рт. ст., то плотность смеси при температуре  $\vartheta$  и давлении  $H$  определяется по формуле

$$\gamma = \frac{H}{760} \cdot \frac{273}{273 + \vartheta} 0,01 [q\gamma_{\text{вод}} + (100 - q)\gamma_{\text{вод}}] \text{ [кг/м}^3].$$

Плотность смеси при 0° С и 760 мм рт. ст. в зависимости от содержания водорода может быть взята из табл. 1-3.

Таблица 1-3

| $q$ [%]           | 100    | 99     | 98     | 97     | 96     | 95     | 94     | 93     | 92     | 91     | 90     |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\gamma$ [кг./м³] | 0,0899 | 0,1019 | 0,1140 | 0,1260 | 0,1380 | 0,1471 | 0,1621 | 0,1741 | 0,1861 | 0,1982 | 0,2102 |

Теплоемкость единицы веса водорода, загрязненного воздухом, быстро падает с понижением чистоты водорода; но благодаря свойствам двухатомных газов, к которым принадлежат как водород, так и воздух, теплоемкость единицы объема смеси не зависит от ее состава, и при измерениях расхода водорода для определения теплоемкости газа можно пользоваться той же формулой, что и для воздуха; однако это не распространяется на смесь водорода с углекислотой, являющейся трехатомным газом.

Калориметрический способ может быть применен и к решению обратной задачи — к определению потерь  $P$ , снимаемых охлаждающей средой в машине или отдаваемых ею в охладителе, если известны расход  $Q$  [м³/сек] и разность температуры до и после рассматриваемого участка вентиляционного тракта  $\vartheta_2 - \vartheta_1$ :

$$P = 4,19CQ(\vartheta_2 - \vartheta_1) \text{ [квт]}.$$

Поскольку входящая сюда разность температуры может быть относительно небольшой, следует обращать особое внимание на ее измерение, для которого надо применять либо батареи термопар, либо термометры с делениями через 0,1—0,2° С и пользоваться их поверочными поправками.

**Пример.** Измеренный расход газа при входе в один из газоохладителей турбогенератора с водородным охлаждением составляет  $Q = 5,45$  м³/сек; температура газа при проходе через газоохладитель согласно измерению батареями дифференциально включенных термопар понижается на  $\Delta\vartheta = 23,7^\circ$  С и на выходе из него равна  $\vartheta_1 = 38,3^\circ$  С. Барометрическое давление при испытании составляет  $H = 748$  мм рт. ст.; газ внутри машины находится под избыточным давлением  $h = 0,05$  атм.

Требуется определить потери, выделяемые в газоохладителе.

Прежде всего следует перевести избыточное давление из атм в мм рт. ст.:

$$h = 0,05 \text{ атм} = 0,05 \cdot 735,5 \text{ мм рт. ст.} = 37 \text{ мм рт. ст.}$$

Тогда абсолютное давление, под которым находится газ, будет равно:

$$H' = H + h = 748 + 37 = 785 \text{ мм рт. ст.}$$

Объемная теплоемкость газа, отнесенная к этому давлению и температуре при входе в газоохладитель

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 + \Delta\vartheta = 38,3 + 23,7 = 62,0^\circ \text{ С,}$$



равна:

$$C = 0,307 \frac{H'}{760} \cdot \frac{273}{273 + \vartheta_2} = 0,307 \frac{785}{760} \cdot \frac{273}{273 + 62} = 0,258 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град};$$

отсюда искомые потери будут:

$$P = 4,19 C Q \Delta \vartheta = 4,19 \cdot 0,258 \cdot 5,45 \cdot 23,7 = 140 \text{ квт.}$$

### 1-18. Измерение расхода жидкостей

Подобно измерению расхода газов, при испытании электрических машин нередко приходится производить измерение расхода жидкостей — масла при принудительной смазке подшипников и подпятников и воды при водяном охлаждении различных частей машины, как, например, тех же подшипников и подпятников, а также воздухо- или газоохладителей. Техника измерения расходов газов и жидкостей в общем основывается на сходных принципах; но применение этих измерений к испытанию электрических машин носит специфические особенности, которые накладываются на них тем обстоятельством, что при измерении расхода газов приходится иметь дело с относительно большими объемами и малыми напорами, в то время как при измерении расхода жидкостей, наоборот, — с относительно малыми объемами и довольно значительными напорами.

Последнее обстоятельство позволяет применять для измерения расхода жидкостей такие способы, которые связаны с заметной потерей напора на измерительном устройстве, что совершенно недопустимо при измерении расхода газов. Напор в водопроводах и маслопроводах почти всегда больше того, который необходим для правильного функционирования обслуживаемых ими узлов, и избыток его все равно приходится гасить в дроселирующих устройствах; поэтому потеря даже значительной части этого напора в измерительном устройстве не играет роли.

Из числа известных способов измерения расхода жидкостей в практике испытания электрических машин применяются следующие.

**1. Способ мерного бака.** Жидкость, расход которой подлежит измерению, сливается в сосуд с точно известной емкостью; продолжительность заполнения этого сосуда измеряется при помощи секундомера или часов.

Если  $V$  — емкость сосуда в литрах и  $T$  — продолжительность его заполнения в минутах, то искомый расход будет равен:

$$Q = \frac{V}{T} \text{ [л/мин]}.$$

С точки зрения достаточной точности измерения времени желательно выбирать емкость сосуда так, чтобы продолжитель-

ность его заполнения была не меньше 1 мин; верхний же предел емкости сосуда определяется соображениями удобства его опорожнения по окончании измерения.

Рекомендуется производить измерение каждого расхода по крайней мере дважды.

Если определение емкости сосуда обмером встречает затруднения (например вследствие сложности его формы), то придется прибегать к его взвешиванию в порожнем и в наполненном состояниях.

Для измерения относительно больших расходов этот способ мало пригоден.

**2. Способ механического водомера.** Существует большое количество систем водомеров с вертушками, качающимися перегородками и т. п., с передачей движения на счетный механизм, градуированный в единицах объема.

Как правило, водомеры требуют установки в горизонтальных участках трубопроводов, причем для правильности показаний необходимо, чтобы до и после водомера были прямолинейные участки неизменного диаметра с длиной, не меньшей пятикратного диаметра трубопровода.

Предпочтительна установка водомеров в напорных трубопроводах, однако может быть допущена установка их и в сливных трубопроводах при условии, что они целиком заполнены жидкостью.

Пропускная способность водомера зависит от его калибра, т. е. диаметра входного отверстия, от системы водомера, от рода жидкости, ее температуры и продолжительности работы водомера; она понижается с увеличением вязкости жидкости, т. е. для масла ниже, чем для воды, и с увеличением температуры. При непродолжительном действии, например не более 1 часа, пропускная способность может быть повышена в 2—2,5 раза.

Перегрузка водомера сверх его пропускной способности может повредить его внутренние части; недогрузка же понижает точность измерения, которая нормально составляет 2—3%, поэтому не следует применять водомеры для измерения расходов менее 20—25% предельного допустимого при данных условиях.

**3. Способ диафрагмы.** Если в трубопровод врезать диафрагму, имеющую отверстие с диаметром, меньшим диаметра трубопровода, то падение напора на этой диафрагме, измеряемое дифференциальным манометром, может служить мерой расхода жидкости через трубопровод.

При соблюдении ряда правил способ диафрагмы обеспечивает вполне достаточную точность измерения расхода, причем для диаметров трубопроводов от 50 мм и выше диафрагмы не требуют градуировки; поэтому способ диафрагмы особенно пригоден для измерения относительно больших расходов, какими являются обычно расходы воды в охладителях разного рода.

Согласно законам гидродинамики, расход  $Q$  несжимаемой жидкости через диафрагму с диаметром  $d$  (в метрах) может быть получен из равенства

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \alpha \sqrt{2gh \frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma}} \text{ [м}^3\text{/сек]},$$

где  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  — ускорение силы тяжести;

$h$  — показание дифференциального манометра (в метрах);

$\gamma_h$  — плотность жидкости, заполняющей манометр;

$\gamma'$  — плотность жидкости в трубке над жидкостью, заполняющей манометр;

$\gamma$  — плотность жидкости, расход которой подвергается измерению;

$\alpha$  — так называемый коэффициент расхода, определяемый ниже.

Так как более удобно определять расход в кубических метрах в час, а показание манометра и диаметр отверстия диафрагмы выражать в миллиметрах, то для вычисления следует написать это равенство в таком виде:

$$\begin{aligned} Q &= 3600 \frac{10^{-6}}{\sqrt{1000}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \alpha \sqrt{2gh \frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma}} = \\ &= 0,000396 d^2 \alpha \sqrt{h \frac{\gamma_h - \gamma'}{\gamma}} \text{ [м}^3\text{/час]}. \end{aligned}$$

Если манометр заполнен ртутью, то  $\gamma_h = 13,55 \text{ г/см}^3$ ; если же, как это обычно практикуется, над ртутью в манометре находится вода, то  $\gamma' \approx 1 \text{ г/см}^3$ ; отсюда

$$Q = 0,0014 d^2 \alpha \sqrt{\frac{h}{\gamma}} \text{ [м}^3\text{/час]}.$$

Плотность воды при различной температуре может быть взята из табл. 1-4.

Таблица 1-4

| $\vartheta$ [° C]             | 0     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma$ [г/см <sup>3</sup> ] | 1,000 | 1,000 | 0,998 | 0,996 | 0,992 | 0,988 | 0,983 |

Для того чтобы результат вычисления расхода жидкости по вышеприведенной формуле был правильным, необходимо соблюдение ряда условий:

а) отношение диаметра отверстия диафрагмы  $d$  к диаметру трубопровода  $D$  должно быть в пределах

$$0,2 \leq \frac{d}{D} \leq 0,8;$$

б) до и после диафрагмы трубопровод неизменного диаметра  $D$  должен иметь прямолинейные участки длиной ни в коем случае не меньше  $5D$ ; наличие изменений диаметра, поворотов и вентилей заставляет значительно увеличивать длину прямолинейных участков до диафрагмы, если только  $\frac{d}{D} > 0,4 \div 0,5$ ;

в) входная кромка отверстия диафрагмы должна быть как можно более острой, тем в большей степени, чем меньше диаметр отверстия, и не иметь забоин, заусенцев и т. п.;

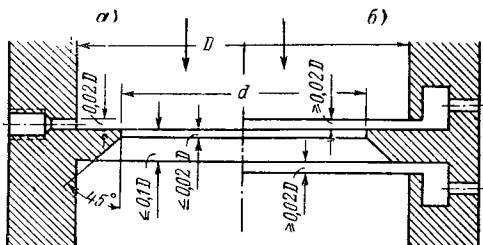


Рис. 1-28. Размеры и конструкция диафрагм:  
а — с простыми каналами; б — с кольцевыми камерами.

г) внутренняя поверхность трубопровода перед диафрагмой должна быть вполне гладкой; выступание прокладок, сварных швов и т. п. недопустимо;

д) отверстие диафрагмы должно быть точно центрировано по отношению к трубопроводу;

е) трубопровод должен быть целиком заполнен жидкостью; из этих соображений установка диафрагмы на напорном трубопроводе предпочтительнее, чем на сливном;

ж) размеры диафрагмы должны соответствовать рис. 1-28;

з) число Рейнольдса  $Re$  должно быть не меньше предельной величины, взятой из табл. 1-5.

При соблюдении всех этих условий коэффициент расхода  $\alpha$  может быть взят из этой же таблицы.

Числом Рейнольдса называется безразмерная величина, представляющая отношение произведения скорости жидкости в трубопроводе  $v$  (в метрах в секунду) на диаметр трубопровода  $D$  (в метрах) к так называемой кинематической вязко-

Таблица 1-5

|          |        |        |        |        |        |        |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $d : D$  | 0,20   | 0,30   | 0,35   | 0,40   | 0,45   | 0,50   |
| Re       | 26 000 | 34 000 | 41 000 | 53 000 | 72 000 | 95 000 |
| $\alpha$ | 0,597  | 0,601  | 0,605  | 0,610  | 0,616  | 0,621  |

|          |         |         |         |         |         |         |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $d : D$  | 0,55    | 0,60    | 0,65    | 0,70    | 0,75    | 0,80    |
| Re       | 127 000 | 173 000 | 234 000 | 318 000 | 457 000 | 720 000 |
| $\alpha$ | 0,635   | 0,648   | 0,667   | 0,690   | 0,721   | 0,761   |

сти жидкости  $\nu$  (в квадратных метрах в секунду) при данной температуре  $\vartheta$ :

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{4QD}{3600\pi D^2\nu} = \frac{0,000354Q}{D\nu}.$$

Значения кинематической вязкости  $\nu$  для воды в зависимости от температуры  $\vartheta$  могут быть взяты из табл. 1-6.

Таблица 1-6

|                                |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\vartheta [^{\circ}C]$        | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   |
| $\nu [m^2/сек] \times 10^{-6}$ | 1,79 | 1,31 | 1,01 | 0,81 | 0,70 | 0,56 | 0,48 |

**Пример.** Производится измерение расхода охлаждающей воды через один из восьми газоохладителей крупного турбогенератора с водородным охлаждением. Диаметр напорного трубопровода  $D = 100$  мм, диаметр отверстия диафрагмы  $d = 50$  мм, температура воды  $28^{\circ}C$ . Напор, измеренный дифференциальным ртутным манометром, равен  $h = 372$  мм.

Плотность воды при температуре  $28^{\circ}C$ , согласно табл. 1-4,  $\gamma = 0,996$  г/см<sup>3</sup>; коэффициент расхода для  $d : D = 0,5$ , согласно табл. 1-5,  $\alpha = 0,624$ . Отсюда искомый расход

$$Q = 0,0014d^2\alpha \sqrt{\frac{h}{\gamma}} = 0,0014 \cdot 50^2 \cdot 0,624 \sqrt{\frac{372}{0,996}} = 42,3 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Кинематическая вязкость воды при температуре  $28^{\circ}C$ , согласно табл. 1-6, может быть взята  $\nu = 0,84 \cdot 10^{-6}$ ; отсюда число Рейнольдса

$$Re = \frac{0,000354Q}{D\nu} = \frac{0,000354 \cdot 42,3 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 0,84} = 178 000.$$

По табл. 1-5 наименьшее допустимое число Рейнольдса для данного соотношения диаметров диафрагмы и трубопровода  $Re = 95 000$ ; таким образом, произведенное измерение не требует введения каких-либо поправок.

Наиболее подходящим материалом для изготовления шайб является твердая хромо-никелевая нержавеющая сталь, например марки 2Х18Н9; особенное внимание должно быть обращено на тщательность отделки цилиндрической части отверстия и остроту кромки со стороны входа струи. С течением времени эта кромка затупляется под действием твердых частиц, содержащихся в жидкости; поэтому после длительного пребывания в струе диафрагма становится непригодной для измерений, и тем быстрее, чем меньше диаметр ее отверстия.

Очень существенно, чтобы каналы, служащие для отбора давления до и после диафрагмы, были расположены как можно ближе к диафрагме. В этом отношении более совершенной является конструкция диафрагмы с кольцевыми камерами давления, как это представлено на рис. 1-28, б (правая сторона).

Измерение расхода жидкости может быть применено к определению потерь, уносимых этой жидкостью, например потерь в подшипнике с проточным охлаждением или потерь, передаваемых вентиляционным воздухом или водородом охлаждающей воде.

Для этого должны быть достаточно точно известны расход жидкости  $Q$  и ее температура при входе и выходе из рассматриваемого устройства:  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ . Если расход выражен в литрах в секунду, то величина потерь в киловаттах будет равна:

$$P = 4,19 Q \gamma c (\vartheta_2 - \vartheta_1) \text{ [квт]}.$$

Плотность  $\gamma$  должна быть отнесена к температуре жидкости в том месте, где измеряется ее расход; она может быть взята из табл. 1-4. Теплоемкость  $c$ , относимая к единице веса жидкости, для воды практически равна 1,0 ккал/кг·град, а для большинства смазочных масел может быть принята равной  $c = 0,48$  ккал/кг·град.

Измерение температуры  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  должно производиться термометрами с делениями через 0,1 или 0,2° С, имеющими поверочные свидетельства с поправками, и только при вполне установившемся тепловом состоянии.

Для увеличения точности измерения желательно производить его при минимальном возможном расходе жидкости с целью увеличения разности отсчетов по термометрам.

Может быть также рекомендовано измерение разности температуры  $\Delta\vartheta$  при помощи батарей дифференциально включенных термпар.

В машинах с замкнутым циклом вентиляции не всегда может быть произведено измерение расхода охлаждающего газа; так, в машинах с водородным охлаждением газоохладители встраиваются в корпус машины, что не дает возможности применения каких-либо измерителей расхода, кроме измерительных элементов электротермоанемометра, встраиваемых в достаточно

больших количествах внутрь машины, что является мало доступным при обычных промышленных испытаниях.

В этом случае измерение расхода охлаждающего газа может быть произведено через измерение расхода охлаждающей воды, ее температуры до и после охладителя и температуры газа до и после охладителя.

Если считать, что все тепло, теряемое газом в охладителе, приобретается водой, что весьма близко к действительности, то будет иметь место равенство

$$\Delta\vartheta_{г} c_{г} \gamma_{г} Q_{г} = \Delta\vartheta_{ж} c_{ж} \gamma_{ж} Q_{ж},$$

где  $\Delta\vartheta$  — разность температуры до и после охладителя,  $c$  — теплоемкость,  $\gamma$  — плотность и  $Q$  — расход соответственно для газа и для жидкости; следует лишь позаботиться, чтобы однородные величины измерялись одинаковыми единицами.

### 1-19. Измерение вибраций и биений

Причины возникновения вибраций различных частей электрических машин крайне разнообразны; подробное перечисление их не входит в задачи данной книги.

Поэтому здесь рассматриваются только наиболее характерные и часто встречающиеся виды вибрации (главным образом подшипников машин) с точки зрения их измерения.

Обычной причиной вибрации подшипников несопряженной машины является недостаточно полная уравновешенность ее вращающейся части. Частота этой вибрации равна:

$$f' = \frac{n}{60} [гц],$$

где  $n$  — скорость вращения в об/мин.

В двухполюсных турбогенераторах и турбодвигателях на эту вибрацию может накладываться еще вибрация с двойной частотой:

$$f'' = \frac{n}{30} [гц],$$

происходящая от того, что момент сопротивления сечения ротора по двум взаимно перпендикулярным осям неодинаков вследствие неравномерности распределения пазов по окружности ротора.

В машинах переменного тока корпус статора может вибрировать с удвоенной частотой переменного тока  $f$ :

$$f''' = 2f [гц];$$

эта вибрация объясняется тяжением, производимым каждым полюсом магнитного поля машины. Она способна передаваться

от статора подшипникам, если связь между ними достаточно жестка. Очевидно, что в двухполюсных турбогенераторах

$$f'' = f''.$$

В машинах, сопряженных с другими машинами или механизмами, на все указанные вибрации может накладываться еще вибрация от неуравновешенности этих машин или механизмов и от недостаточно правильной прицентровки. Частота таких вибраций обычно равна  $f'$ .

При чрезмерной вязкости смазочного масла в подшипниках, например из-за слишком низкой его температуры, также может появиться вибрация, причем частота ее обычно ниже, чем  $f'$ ; нередко она бывает близка к  $0,5 f'$ .

Кроме всего, вибрация может иметь и постороннее происхождение — от других работающих машин, иногда находящихся на значительном расстоянии от данной машины, попадающей в зону пучности резонансных колебаний.

Простейшим способом измерения вибраций является применение для этой цели индикатора часового типа, наконечник которого упирается в ту точку и в том направлении, в которых требуется произвести измерение вибрации, а корпус укрепляется на основании, не подверженном вибрации. При этом стрелка индикатора колеблется с частотой измеряемой вибрации в пределах более или менее устойчивого угла, величина которого и оценивается по шкале индикатора в сотых долях миллиметра. Этот способ пригоден при частоте вибрации не более 10—12 гц, что соответствует скорости вращения 600—750 об/мин.

Для качественного сравнения этот способ может применяться и при относительно более высоких частотах вибрации, но количественная правильность отсчетов утрачивается.

Главное затруднение при применении этого способа состоит в отыскании неподвижного основания для крепления индикатора, так как вибрация машины передается окружающим предметам. Достаточно надежное решение вопроса представляет крепление индикатора к тяжелой массе, подвешенной на кране, но необходимость перемещения крана с последующим полным успокоением качаний массы для каждого нового измерения сильно затрудняет и затягивает процесс измерения. Компромиссное решение состоит в прикреплении корпуса индикатора к массе, удерживаемой в руках; чем больше эта масса, тем надежнее результат измерения, но в то же время тем труднее его выполнение, в особенности для измерения вибрации в вертикальном направлении.

Специальными инструментами для измерения вибраций являются **виброметры** — показывающие приборы, или **вибрографы** — записывающие приборы, конструкции и принципы



действия которых чрезвычайно разнообразны. Вне зависимости от этого, те и другие можно разделить на две группы: приборы, которые для измерения должны целиком устанавливаться или прикрепляться на вибрирующем предмете, и приборы, которые имеют отдельную часть, или датчик, воспринимающую вибрации и передающую их основному прибору, перерабатывающему получаемый сигнал в объективный отсчет или запись.

Наиболее совершенные современные виброметры и вибрографы относятся ко второй группе приборов; такое устройство позволяет быстро производить поочередное измерение вибраций одного и того же объекта в различных направлениях и переносить измерение с одного объекта на другой.

Достоинствами хорошего виброизмерительного прибора являются широта диапазона частот, для которых пригоден прибор, независимость показаний от частоты и достаточная точность измерения, погрешность которого не должна, во всяком случае, превышать в среднем  $\pm 5\%$  измеряемой величины.

При измерении вибрации подшипников горизонтальных валов подлежат определению составляющие вибрации по трем взаимно перпендикулярным направлениям — поперечная, продольная и вертикальная, причем первые две — на уровне оси вала. Для подшипников вертикальных валов должны определяться составляющие по двум взаимно перпендикулярным направлениям в горизонтальной плоскости и вертикальная составляющая.

Мерой вибрации является двойная ее амплитуда (или размах), измеряемая обычно либо в сотых долях миллиметра, либо в микронах (мкм).

Общеустановленных норм для допустимой величины вибрации в зависимости от скорости вращения в СССР не существует; поэтому можно привести только неофициальные нормы, принятые некоторыми крупными электромашиностроительными заводами (табл. 1-7).

Таблица 1-7

| Скорость вращения, об/мин | 500 | 600 | 750 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 4000 | 5000 |
|---------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Допустимая вибрация, мкм  | 160 | 140 | 120 | 100  | 85   | 70   | 60   | 50   | 40   | 30   |

Преимущество вибрографов перед виброметрами состоит в том, что они позволяют судить не только о величине вибрации, но и об ее частоте, что зачастую дает возможность определить причину вибрации.

Общим недостатком всех перечисленных способов является то, что они не дают возможности измерения вибраций непосредственно самих вращающихся частей, что было бы гораздо целесообразнее для выяснения их причин. В этом направлении сделано немало усилий и предложено значительное количество способов, основанных на измерении изменения зазора между поверхностью вращающейся части и какой-либо поверхностью или точкой, неподвижной в пространстве, за счет изменения емкости, индуктивности или интерференции радиоволны, отраженной вращающейся поверхностью; однако все эти способы, во-первых, требуют применения сложной и громоздкой аппаратуры, во-вторых, не отличаются необходимой точностью и, в-третьих, нуждаются в наличии на вращающейся части непрерывной хорошо отшлифованной цилиндрической поверхности, биение которой по отношению к геометрической оси вращающейся части практически равно нулю. По этим причинам ни один из них до сего времени не получил сколько-нибудь широкого применения.

Измерение биения вращающихся частей некоторым образом сходно с измерением вибраций, но отличается от последнего тем, что производится при очень медленном вращении, когда динамические явления не могут иметь места. Практически измерение биения производится на поверхности коллекторов, контактных колец и свободных концов валов или насаженных на них полумуфт.

Наиболее распространенным инструментом для измерения биения является индикатор. При измерении биения гладких поверхностей наконечник индикатора упирается непосредственно в них; но для измерения биения прерывистой поверхности коллектора приходится пользоваться хорошо притертой к ней щеткой.

Если вращающаяся часть покоится в подшипниках качения, то место расположения индикатора безразлично; но при подшипниках скольжения следует располагать его или сверху, или снизу, так как покачивание шеек вала во вкладышах, имеющих масляный зазор, превосходящий величину возможного биения, может совершенно исказить результаты измерения в случае расположения индикатора сбоку.

Если проворачивание вращающейся части производится на своем ходу, то поверхность коллектора оказывается под напряжением; чтобы исключить возможность замыкания на землю через индикатор, его обязательно следует надежно изолировать от корпуса машины или применять наращивание измерительного стержня индикатора насадкой из твердого изолирующего материала, например из кости.

Во всех случаях измерения биения должно быть обращено особое внимание на хорошую установку штатива индикатора, исключаящую всякое покачивание. Вполне допустимым является прикрепление штатива струбцинками к близлежащим неподвижным частям машины.

Измерение биения коллекторов производится как в холодном, так и в нагретом состоянии машины с целью проверки их монолитности; при этом особенно важно произвести измерение непосредственно после испытания при повышенной скорости вращения в нагретом состоянии.

При измерении биения коллекторов необходимо обращать внимание не только на общую величину биения, но и на его характер. Плавное движение стрелки индикатора свидетельствует о достаточной цилиндричности коллектора. Напротив, судорожные подергивания стрелки и скачкообразные изменения ее положения указывают на местные нарушения цилиндричности, особенно опасные для работы щеточного аппарата, вызываемые провалами или выступаниями отдельных пластин или целых групп пластин вследствие недостаточно доброкачественной формовки коллектора. В случае возможности поворачивания коллектора на небольшие углы может быть снято распределение биения по окружности, после чего показания индикатора могут быть графически отложены в зависимости от углов поворота: если поверхность коллектора цилиндрична, но имеет эксцентриситет по отношению к оси вала, то эта зависимость будет синусоидальной с одним периодом за оборот вала; однако при этом следует иметь в виду, что произведенные таким образом измерения не отличаются высокой точностью.

Предельные допустимые значения биения коллекторов официально не нормированы; поэтому здесь могут быть приведены только нормы, принятые некоторыми крупными электромашиностроительными заводами для внутреннего употребления.

Таблица 1-8

| Диаметр коллектора,<br>мм | Скорость вращения,<br>об/мин | Биение, мм           |                     | Допустимое увеличение биения в горячем состоянии по сравнению с холодным, мм |
|---------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                           |                              | в холодном состоянии | в горячем состоянии |                                                                              |
| До 250                    | До 3000                      | 0,02                 | 0,04                | 0,02                                                                         |
| От 250 до 350             | От 750 до 2000               | 0,02                 | 0,04                | 0,02                                                                         |
| " 350 " 600               | " 600 " 1250                 | 0,03                 | 0,05                | 0,03                                                                         |
| " 600 " 900               | " 500 " 850                  | 0,03                 | 0,06                | 0,04                                                                         |
| " 900 " 1500              | " 450 " 700                  | 0,04                 | 0,07                | 0,04                                                                         |
| Свыше 1500                | До 400                       | 0,04                 | 0,07                | 0,05                                                                         |

Данные таблицы относятся к измерениям, производимым при окружной скорости не более 1 м/сек и к случаю равномерного распределения биения по окружности; выступание отдельных пластин не допускается.

Удовлетворительный результат измерения биения не дает гарантии того, что при полной рабочей скорости вращения дан-

ная поверхность будет работать спокойно; под влиянием местных неуравновешенностей вращающаяся часть может претерпевать деформации, вызывающие увеличение биения по сравнению с измеренным при весьма малой скорости вращения, когда такие деформации не наступают.

Наоборот, иногда наблюдается, что поверхность, совершенно спокойно работающая при полной скорости вращения, имеет значительное биение при малой скорости вращения; такой случай характерен для коллекторов, у которых доводка поверхности произведена при полной скорости вращения.

Таким образом, измерение биения носит весьма условный характер, что всегда следует иметь в виду при его проведении.

### **1-20. Измерение электрического напряжения между концами вала**

Во вращающихся валах электрических машин могут наводиться электродвижущие силы; при наличии цепи, замыкающейся через подшипники и корпус или фундаментную плиту машины, под действием этих э. д. с. возникают токи, достигающие весьма крупных значений ввиду малости сопротивления такой цепи и представляющие опасность для подшипников, в которых они вызывают разъедание трущихся поверхностей, ведущее к расплавлению вкладышей.

Эти э. д. с. могут быть как постоянными, так и переменными.

Постоянные э. д. с. характерны для машин постоянного тока с неправильно выполненными соединениями обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки или последовательной обмотки главных полюсов, образующими виток вокруг вала. Намагничивающая сила этого витка оказывается достаточной для постоянного продольного намагничивания вала. При его вращении в собственном магнитном поле в нем возникает явление униполярной индукции.

В правильно сконструированных машинах постоянного тока обращается внимание на то, чтобы соединения обмоток последовательной цепи по отношению к валу представляли по возможности бифиляр; хотя полностью устранить явление униполярной индукции не удастся, тем не менее все же оказывается возможным свести индуцированные э. д. с. до безопасной величины.

Если наложить на вал машины по обе стороны от якоря медные щетки, соединенные с магнитоэлектрическим вольтметром, то при условии изоляции хотя бы одного из подшипников последний измерит величину э. д. с. униполярной индукции. Эта э. д. с. совершенно не зависит от возбуждения ненагруженной машины, но зависит от ее токовой нагрузки, причем безразлично, в каком режиме.

Для примера на рис. 1-29 представлена зависимость э. д. с. в вале от тока нагрузки, экспериментально полученная в режиме короткого замыкания крупного генератора постоянного тока. На графике отчетливо видно влияние гистерезиса. Если снять нагрузку, то с течением времени остаточное намагничивание вала ослабевает и величина э. д. с. падает.

Аналогичное явление наблюдается в зависимости от тока возбуждения в синхронных машинах, у которых соединения между отдельными полюсами образуют обычно полный виток вокруг вала; однако ввиду того, что токи возбуждения даже очень крупных синхронных машин значительно уступают по величине токам нагрузки крупных машин постоянного тока, в синхронных машинах это явление выражено гораздо слабее.

Переменные э. д. с. могут возникать в валах машин всех видов; источниками их являются всякого рода местные увеличения сопротивления в магнитной цепи рабочего потока машины, различные несимметричности и т. п.

В этом отношении наиболее характерны машины переменного тока с подразделенными на части статорами; в настоящее время так выполняются только крупные гидрогенераторы, в которых применяется подразделение на 2, 3, 4 или 6 частей, и крупные тихоходные синхронные машины с горизонтальным валом (главным образом двигатели для привода поршневых насосов и компрессоров) с разъемом статора по горизонтальной плоскости на две части.

Аналогичное действие, хотя и не в столь сильной степени, оказывают стыки отдельных листов активной стали статора, пазы для ее направляющих клиньев, сквозные отверстия для стяжных шпилек и т. п.

Если обозначить количество таких мест увеличения магнитного сопротивления через  $m$ , число пар полюсов машины через  $p$  и их общий наибольший делитель через  $d$ , то наибольшая опасность возникновения переменных э. д. с. наступает тогда, когда

$$\frac{m}{d} = 2i + 1,$$

где  $i$  — любое целое число, причем частота этой э. д. с. равна частоте в обмотке статора, увеличенной в  $\frac{m}{d}$  раз.

В противоположность постоянным э. д. с., переменные э. д. с. не зависят от тока нагрузки машины, но зависят от ее магнитного потока. При этом э. д. с., возникающие под действием разъемов статора, по мере увеличения магнитного потока в машине сначала возрастают примерно пропорционально потоку, но затем, по мере увеличения насыщения, начинают убывать, так как влияние разъемов при большом насыщении сглаживается

(рис. 1-30, кривая *a*). Напротив того, э. д. с., вызванные стыками листов активной стали, сначала очень невелики, так как магнитная проводимость листов, перекрывающих стыки, вполне достаточна для почти равномерного распределения магнитного напряжения в сердечнике; но при дальнейшем увеличении потока эти листы быстро насыщаются, и э. д. с. соответственно возрастает (рис. 1-30, кривая *б*).

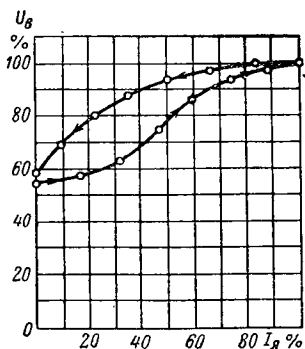


Рис. 1-29. Зависимость постоянной э. д. с. в вале машины постоянного тока от тока нагрузки.

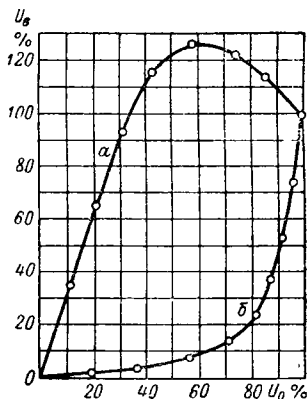


Рис. 1-30. Зависимость переменной э. д. с. в вале машины переменного тока от потока.

Из других причин возникновения переменных э. д. с. наиболее существенной является неравномерность зазора между статором и ротором. В двухполюсных турбогенераторах малейшая неточность центровки ротора по отношению к статору вызывает появление между концами вала ротора э. д. с. основной частоты, достигающей в крупных машинах десятков вольт.

Измерение напряжения между концами вала входит в программы приемо-сдаточных испытаний крупных синхронных машин — турбогенераторов (ГОСТ 533-51), гидрогенераторов (ГОСТ 5616-50) и синхронных компенсаторов (ГОСТ 609-54). Для этих машин, кроме того, нужно производить измерение напряжения между изолированной опорой (подшипником или подпятником) и корпусом или фундаментной плитой при закороченных масляных пленках всех опор — как изолированных, так и не изолированных; это закорачивание следует производить медными щетками, накладываемыми на вал в непосредственной близости от опоры и надежно соединенными с корпусом опоры короткими медными проводниками значительного сечения.

В случае нарушения изоляции какой-либо из изолированных опор напряжение между ней и корпусом или плитой должно быть меньше напряжения в участке вала между данной опорой и ближайшей к ней неизолированной опорой. Однако равенство этих напряжений не может служить достоверным свидетельством того, что изоляция опоры имеет предписанное значение.

Токи в подшипниках при неизолированных опорах могут быть измерены посредством трансформатора тока без первичной обмотки, имеющего достаточное окно для прохода через него вала машины и подвешенного на надежных растяжках. Для обеспечения правильности результатов измерения желательно, чтобы сердечник такого трансформатора был неразъемным, что, однако, создает затруднения в его применении, так как требует разборки машины для его установки.

### 1-21. Запись изменяющихся величин

При многих испытаниях электрических машин требуется производить снятие зависимости различных величин от времени, для чего эти величины должны записываться либо непрерывно, либо через определенные промежутки времени. Для этого применяется ряд способов.

**1. Запись по команде.** Каждый прибор, показания которого должны быть записаны, обслуживается отдельным наблюдателем. Отсчеты производятся всеми наблюдателями одновременно по сигналам, подаваемым через определенные промежутки времени посредством ударов в колокол, свистков, вспышек лампы или голосом, и записываются каждым наблюдателем отдельно. Хорошо натренированный персонал может производить отсчеты и запись показаний через каждые 5—6 сек.

Этот способ не требует применения никакой специальной аппаратуры, но зато нуждается в большом количестве персонала и не допускает контроля возможных ошибок в записях иначе, как путем повторения процесса, что не всегда является возможным. Понятно, что он может быть применен лишь к относительно медленным процессам с общей продолжительностью не менее 1,5—2 мин., притом к таким, на протяжении которых все измеряемые величины изменяются более или менее плавно. Ускорение записи до 1—2 сек., однако со значительной потерей точности, возможно путем наклеивания на стекло над шкалой каждого прибора куска бумаги соответствующей формы, на которой каждый из наблюдателей вместо отсчета ставит штрих остро отточенным карандашом против положения указателя в данный момент; по окончании процесса у каждого штриха надписывается соответствующий отсчет.

Такой способ пригоден только в тех случаях, когда все измеряемые величины во все время опыта изменяются монотонно, т. е. только возрастают или только убывают,

**2. Кинематографическая запись.** Показания всех приборов снимаются через определенные промежутки времени на фотографическую пленку. Несмотря на название способа, применение киносъемочной камеры далеко не всегда обязательно; в большинстве случаев вполне достаточной является обыкновенная малоформатная камера, работающая на кинематографической пленке. Крайне желательно, чтобы передвижение пленки и заводка затвора были объединены в одну операцию; лучшие системы камер удовлетворяют этому требованию. Если количество измерительных приборов, показания которых подлежат записи, невелико, то следует рекомендовать применение телеобъективов, так как с ними можно получать изображение в более крупном масштабе.

Камера располагается на прочной стойке объективом вниз; приборы размещаются прямо под ней, причем так, чтобы плоскость шкалы каждого из них была перпендикулярна лучу, проведенному к ней из центра объектива; в противном случае снятые показания будут искажены параллаксом. Если одновременно с прочими приборами фотографируется секундомер, пущенный в момент начала процесса, то каждый снимок будет ориентирован во времени.

Шкалы приборов должны быть очень хорошо освещены; чем больше ламп применяется для этой цели и чем равномернее они расставлены вокруг приборов, тем менее заметны тени, отбрасываемые на шкалы указателями, которые на снимках могут быть спутаны с самими указателями. Перед началом опыта необходимо убедиться в том, что стекла приборов не дают отблесков от ламп по направлению к объективу камеры.

Этот способ особенно пригоден в том случае, когда требуется произвести запись показаний одного единственного прибора; тогда ось камеры располагается точно над осью подвижной системы прибора, а секундомер может быть положен прямо на его корпус в этом же месте.

Иногда представляется целесообразным применить вместо точных измерительных приборов — щитовые (технические) приборы, так как они имеют гораздо более заметные указатели; в этом случае ось камеры располагается горизонтально.

При применении обычной фотографической камеры скорость съемки может быть доведена до 30 снимков в минуту, что, конечно, гораздо меньше скорости, которую дает киносъемочная камера; однако следует иметь в виду, что инерция подвижных систем измерительных приборов препятствует правильной записи быстро изменяющихся процессов.

**3. Запись посредством самопишущих приборов.** Применение самопишущих (регистрирующих) приборов имеет то преимущество, что их запись является непрерывной; благодаря большой потребляемой мощности и сильному успокоению регистри-



рующие приборы вносят меньшие искажения в измерение быстро изменяющихся величин, чем обычные.

Крайне важным при применении регистрирующих приборов является правильное ориентирование записей отдельных приборов во времени и друг относительно друга. Наилучшие результаты в этом отношении дает одновременное нанесение на все записи отметок времени посредством кратковременного замыкания цепей приборов параллельного включения (вольтметров, обмоток напряжения ваттметров и т. д.) и замыкания накоротко цепей приборов последовательного включения (амперметров, обмоток тока ваттметров), которое можно производить при помощи промежуточного реле, управляемого каким-либо механизмом, отсчитывающим время, или от руки по секундомеру.

**4. Осциллографическая запись.** Ни один из перечисленных выше способов не может обеспечить запись процессов со всеми подробностями так, как это способен дать осциллограф; но наряду с этим следует отметить, что точность этой записи относительно невелика и обработка ее трудоемка и требует большой тщательности в определении масштабов. Как правило, это последнее следует производить на токе того же рода, что и измеряемый, так как масштабы, определенные на постоянном токе, могут оказаться неправильными для процессов, записанных на переменном токе, и наоборот. В ответственных случаях рекомендуется производить определение масштабов дважды — до записи процесса и после нее. При одновременной записи нескольких величин не следует совмещать нулевые линии отдельных вибраторов, так как очень трудно сделать это достаточно правильно.

Отметки времени при записях с большими скоростями движения светочувствительной ленты производятся посредством специальных вибраторов, дающих определенную частоту; при средних скоростях их можно наносить посредством обыкновенного вибратора, включаемого под сетевое напряжение нормальной частоты; при очень малых скоростях они наносятся при помощи хронографа, включающего один из вибраторов на источник постоянного тока, например батарею.

Хорошие результаты дает также применение метронома или иного часового механизма, маятник которого при каждом качании заслоняет на короткий промежуток времени луч одного из вибраторов и этим делает его запись прерывистой.

Записи при помощи осциллографа поддаются как наиболее быстро протекающие процессы, так и весьма продолжительные,

---

## ЧАСТЬ ВТОРАЯ

### ИСПЫТАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### 2-1. Программы типовых и контрольных испытаний

В качестве обязательной ГОСТ 183-55, п. 33, устанавливает следующую программу типового испытания машин постоянного тока (генераторов и двигателей):

- \* а) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- \* б) измерение сопротивлений обмоток в практически холодном состоянии;
- \* в) испытание при повышенной скорости вращения;
- \* г) испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- \* д) испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмотки якоря;
- \* е) проверка коммутации при кратковременной перегрузке по току (допускается в режиме короткого замыкания);
- ж) определение характеристики холостого хода;
- \* з) определение скорости вращения в режиме ненагруженного двигателя при номинальном напряжении и рабочем соединении обмоток (только для двигателей с параллельной и смешанной обмотками);
- \* и) испытание при номинальной нагрузке в течение не менее 60 мин. (для машин мощностью до 100 кВт включительно);
- к) определение потерь в стали и механических потерь;
- л) испытание на нагревание (непосредственной нагрузкой или косвенным методом);
- м) определение зоны безискровой коммутации (для машин с добавочными полюсами) и проверка исправности коммутации;
- н) испытание охлаждающей системы машин, работающих с замкнутым циклом вентиляции; это испытание производят по программе завода, изготовившего охлаждающую систему;
- о) определение уровня радиопомех, создаваемых машиной.

Пункты этой программы, отмеченные звездочкой, составляют программу контрольного испытания,

Нумерация отдельных пунктов программы отнюдь не предопределяет порядок их чередования в процессе проведения испытания; испытываемому предоставляется возможность установить такой порядок чередования испытаний, который является наиболее удобным главным образом с точки зрения наибольшего возможного сокращения операций по переключениям, связанным с переходом от одного испытания к другому.

Первые четыре испытания, являющиеся общими для машин всех видов, были уже рассмотрены выше, и здесь в их отношении могут быть еще добавлены только некоторые специфические особенности.

Программа не делает различия между генераторами и двигателями. Это позволяет видоизменять методику отдельных испытаний применительно к местным возможностям, что особенно важно, когда касается испытания крупных машин (например от 100 кВт и выше).

Благоприятным в этом отношении обстоятельством является то, что почти все испытания на ходу (начиная с п. «д» и далее) допускают проведение их как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Как правило, для крупных машин более удобными являются испытания в режиме генератора вне зависимости от того, предназначена ли машина действительно для работы в режиме генератора, или в режиме двигателя; но для относительно небольших машин нередко больше преимуществ представляет испытание в режиме двигателя.

Наконец, не исключается возможность проведения части испытаний в одном режиме, части в другом.

Помимо ГОСТ 183-55, программы типовых и контрольных испытаний содержат следующие стандарты на специальные виды машин: на тяговые машины — ГОСТ 2582-50, пп. 18 и 19; на генераторы одноколлекторные заряднобуферные — ГОСТ 2535-44, пп. 19 и 20; на генераторы двухколлекторные для зарядки аккумуляторных батарей — ГОСТ 2167-43, пп. 19 и 20; на турбогенераторы малой мощности транспортные — ГОСТ 2308-43, пп. 20 и 21.

Кроме того, указания о составе типовых и контрольных испытаний содержат стандарты: на двигатели крановые, подъемно-транспортные и металлургические — ГОСТ 184-53, пп. 37, 38 и 39; на генераторы для дуговой сварки — ГОСТ 304-51, пп. 35 и 36; на генераторы низковольтные многоамперные двухколлекторные — ГОСТ 1651-54, пп. 34 и 35.

Эти программы большей частью состоят из тех же испытаний, которые входят в состав программы ГОСТ 183-55; лишь в отдельных случаях в них входят испытания, не предусмотренные этой программой.

Кроме того, большинство перечисленных стандартов содер-

жит предписания по условиям проведения отдельных испытаний, специфическим для данного вида машин, а также по методике этих испытаний.

## 2-2. Проверка правильности соединения отдельных частей обмоток

Из всех видов электрических машин наибольшей сложностью и разнообразием внутренних соединений обмоток отличаются машины постоянного тока.

Практика показывает, что ошибки в соединениях, производимых при сборке машин постоянного тока, встречаются очень часто; большинство их приходится на долю соединений внутри магнитной системы. Обнаружение этих ошибок в собранной готовой машине после подачи на испытание во многих случаях требует разборки для их устранения, что вызывает потерю рабочего времени. Поэтому целесообразно производить проверку правильности соединений до сборки машины, когда ее магнитная система вполне доступна.

Внутренние соединения машины постоянного тока можно подразделить на две группы:

- 1) соединения между отдельными частями (катушками или секциями) какой-либо обмотки;
- 2) соединения целых обмоток друг с другом или с доской зажимов (выводов).

Если оставить в стороне обмотки якорей, проверка соединений которых относится к области пооперационного контроля производства, то к первой группе могут быть отнесены только соединения между катушками отдельных полюсов — главных и добавочных.

На главных полюсах могут находиться обмотки:

- а) параллельного возбуждения (шунтовые);
- б) последовательного возбуждения (серийные);
- в) независимого возбуждения;
- г) пусковые;
- д) уравнивательные;
- е) особого назначения.

На добавочных полюсах могут находиться обмотки:

- а) последовательные (основные);
- б) параллельного или независимого питания (вспомогательные).

Несколько особняком стоят компенсационные обмотки, которые хотя и заложены в пазы полюсных башмаков главных полюсов, но создают намагничивание по оси добавочных полюсов, с обмотками которых они соединены наглухо.

Обычно обмотки распределяются поровну между всеми полюсами; однако встречаются случаи, когда какая-нибудь из

перечисленных обмоток накладывается только на половинное число полюсов — через один, как, например, последовательные обмотки слабо компаундированных машин низкого напряжения; встречаются мелкие машины с половинным числом добавочных полюсов.

Катушки всех этих обмоток соединяются между собой так, чтобы образовывать на каждых двух соседних полюсах противоположные полярности, что может быть достигнуто одним из следующих способов:

1. Катушки данной обмотки для всех полюсов выполняются совершенно одинаковыми, но соединяются между собой так, что

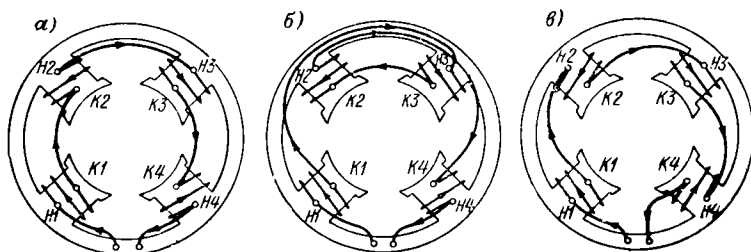


Рис. 2-1. Три способа соединения катушек полюсов.

соседние полюса обтекаются током попеременно в противоположных направлениях (рис. 2-1, а): конец 1 с концом 2, начало 2 с началом 3, конец 3 с концом 4 и т. д.

2. Вполне одинаковые катушки могут быть соединены друг с другом через полюс: конец 1 с началом 3, конец 3 с началом 5, и т. д. для нечетных полюсов, и конец 2 с началом 4, конец 4 с началом 6 и т. д. для четных полюсов; таким образом, все катушки распадаются на две группы — нечетных и четных полюсов; группы эти могут быть соединены между собой как последовательно (рис. 2-1, б), так и параллельно.

3. Катушки для нечетных полюсов наматываются в одном направлении, а для четных — в другом, и соединяются так: конец 1 с началом 2, конец 2 с началом 3 и т. д. (рис. 2-1, в). При этом все соединения получаются одной формы и размеров, что не лишено преимуществ; но так как этим осложняется изготовление из-за необходимости намотки «правых» и «левых» катушек, такой способ применяется значительно реже первых двух.

Когда какая-либо обмотка расположена только на половине общего числа полюсов (через полюс), то она должна быть соединена так, чтобы образовывать одинаковую полярность на

всех тех полюсах, на которых имеются ее катушки, например на всех четных или на всех нечетных.

В машинах на большие токи применяется параллельное или смешанное соединение отдельных катушек обмоток последовательной цепи как главных, так и добавочных полюсов; в этих случаях соединения должны быть выполнены так, чтобы соседние полюса обтекались током в противоположных направлениях.

Для проверки правильности соединений катушек всех этих обмоток могут быть применены следующие способы:

**1. Осмотр с прослеживанием направления обтекания полюсов током в данной обмотке.** Основным условием возможности применения этого способа является полная доступность самих катушек и соединений между ними. Он вполне применим тогда, когда катушки не покрыты изолирующими оболочками, в особенности, если они состоят из небольшого числа витков значительного сечения, так что легко проследить направление их намотки. Обычно этим условиям удовлетворяют катушки обмоток последовательной цепи. Но если даже проследить направление намотки не удастся, способ этот может быть применен в тех случаях, когда заранее известно, что все катушки данной обмотки выполнены одинаково и имеют одинаковое расположение начал и концов.

В машинах открытого исполнения этот способ может быть применен и до сборки, и после сборки, но при защищенном или закрытом исполнении — только до сборки.

**2. Способ магнитной стрелки.** Этот способ, инструментом для которого является магнитная стрелка, подвешенная на тонкой и гибкой нити, при умелом его использовании является весьма надежным. Пользоваться компасом в оправе не рекомендуется, так как его стрелка, обладая ограниченной подвижностью, при не вполне осторожном обращении может перемагничиваться, что ведет к различным недоразумениям и ошибкам.

Этот способ легче всего применять до сборки машины; подавая питание в рассматриваемую обмотку магнитной системы и осторожно поднося магнитную стрелку на нити к внутренним поверхностям полюсных башмаков, можно легко и быстро проследить направления силовых линий поля.

Некоторые затруднения возникают при применении этого способа к обмоткам последовательного питания в машинах на большие токи; так как такие обмотки состоят обычно из очень небольшого числа витков, а питать их токами, соизмеримыми с номинальным, далеко не всегда удается, то создаваемые ими поля оказываются очень слабыми; если при этом магнитная система обладает уже остаточным намагничиванием, то отличить от него эти поля затруднительно. В таких случаях рекомендуется до подачи питания в обмотку определить стрелкой наличие остаточного намагничивания; затем, держа стрелку на под-

веске на таком расстоянии от какого-либо из полюсов, чтобы подвеска только очень незначительно отклонялась от вертикали, начать подавать питание, следя за стрелкой. Если питание создает намагничивание, совпадающее по направлению с остаточным, то подвеска сильнее отклонится от вертикали; тогда, подав наибольшее возможное питание по условиям опыта, можно приступить к проверке описанным способом. Если же эти направления не совпадают, то отклонение подвески от вертикали при подаче питания сначала начнет уменьшаться, а затем, когда создаваемое намагничивание станет сильнее остаточного, стрелка повернется вокруг подвески на пол-оборота.

Способ магнитной стрелки может быть применен в собранной машине, если только есть доступ к полюсным башмакам; для облегчения пользования стрелкой ее можно укрепить посредством очень короткой подвески — немного больше половины длины стрелки — на конце прутка достаточной длины из немагнитного материала.

Если полюсные башмаки недоступны, как, например, при закрытом исполнении машины, то способ магнитной стрелки может быть применен следующим образом: после подачи питания в рассматриваемую обмотку стрелка подносится к головкам болтов, крепящих полюса к ярму, и указывает при этом полярность, противоположную той, которую имеет данный полюс на своей активной поверхности. Однако такое применение способа требует сильного питания рассматриваемой обмотки, а потому для обмоток последовательного питания мало пригодно.

**3. Способ пробной катушки.** Этот способ также требует питания рассматриваемой обмотки.

Инструментом в нем является плоская катушка, намотанная из возможно большего количества концентрических витков тонкой изолированной медной проволоки, приклеенных в один слой к пластинке картона, целлулоида и т. п., по возможности плотнее друг к другу. Форма катушки не играет роли; она может быть круглой, прямоугольной и т. д. Целесообразно вкладывать ее в футляр из тонкой листовой латуни или меди, защищающий витки от повреждений.

Катушка присоединяется либо к флюксметру, либо, при отсутствии последнего, к какому-нибудь чувствительному магнитоэлектрическому прибору; для большинства практических случаев вполне достаточным для этой цели является технический милливольтметр. Проверка может производиться двояко:

а) катушка прикладывается к поверхности полюса и затем быстро сдергивается с нее; при этом замечается направление отклонения стрелки соединенного с ней прибора;

б) катушка прикладывается к поверхности полюса, питание обмотки отключается и, подобно предыдущему, замечается направление отклонения стрелки прибора,

Последний способ позволяет исключить влияние остаточного намагничивания, что очень существенно при проверке обмоток последовательного питания.

Способ пробной катушки применим и к несобранной, и к собранной машине, но в последнем случае главным образом тогда, когда конструкция машины позволяет вводить пробную катушку в зазор между полюсами и якорем. Если же этого сделать нельзя, то, подобно предыдущему способу, можно воспользоваться намагничиванием головок полюсных болтов, прикладывая пробную катушку к их тыльной поверхности; для получения надежных результатов предпочтительнее применять отключение питания, нежели сдергивание катушки.

Соединение катушек обмотки является правильным, если под каждым двумя соседними полюсами отклонения прибора получаются в разные стороны, при условии, что пробная катушка всегда обращена к полюсам одной и той же стороной. Применение флюксметра в качестве указателя позволяет производить не только качественную, но до известной степени и количественную оценку результатов испытания; так, например, если катушки какой-нибудь обмотки на каждом полюсе состоят из нескольких частей, как это делается иногда для улучшения охлаждения в обмотках параллельного или независимого возбуждения («дисковые обмотки»), то в случае неправильного соединения друг с другом отдельных частей на каком-либо полюсе отклонение флюксметра для этого полюса окажется значительно меньшим, чем для прочих.

Практически обычно приходится пользоваться сочетанием первого из описанных способов со вторым или третьим, причем последние два применяются преимущественно для тех обмоток, в которых не удастся проследить направление обтекания полюсов током.

### 2-3. Проверка правильности соединений целых обмоток

Согласно ГОСТ 183-55, п. 59, выводы обмоток машин постоянного тока маркируются первыми буквами их наименований с прибавлением после них цифр 1 (начало) и 2 (конец) — см. табл. 2-1.

При наличии в машине нескольких обмоток одного наименования их начала и концы помимо буквенных обозначений должны иметь цифровые обозначения: 1—2, 3—4, 5—6 и т. д.

Для определения понятий «начало» и «конец» установлено правило: при правом вращении в режиме двигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток на главных полюсах) должен протекать в направлении



Таблица 2-1

| № п/п. | Наименование обмотки                                       | Начало | Конец  |
|--------|------------------------------------------------------------|--------|--------|
| 1      | Обмотка якоря . . . . .                                    | Я1     | Я2     |
| 2      | Компенсационная обмотка . . . . .                          | К1     | К2     |
| 3      | Обмотка добавочных полюсов (основная)                      | Д1     | Д2     |
| 4      | Последовательная обмотка возбуждения (серпесная) . . . . . | С1     | С2     |
| 5      | Параллельная обмотка возбуждения (шунтовая) . . . . .      | Ш1     | Ш2     |
| 6      | Пусковая обмотка . . . . .                                 | П1     | П2     |
| 7      | Уравнильный провод и уравнильная обмотка . . . . .         | У1     | У2     |
| 8      | Обмотка особого назначения . . . . .                       | 01; 03 | 02; 04 |

от начала (1) к концу (2); под правым вращением понимается вращение по часовой стрелке, если смотреть на машину со стороны приводного конца вала, а в машинах с двумя приводными концами вала — со стороны, противоположной коллектору.

Для тяговых машин ГОСТ 2582-50, п. 32, устанавливает несколько иную систему обозначений выводов (см. табл. 2-2).

Таблица 2-2

| № п/п. | Наименование обмотки                                               | Начало | Конец |
|--------|--------------------------------------------------------------------|--------|-------|
| 1      | Обмотка якоря . . . . .                                            | Я      | ЯЯ    |
| 2      | Последовательная обмотка возбуждения                               | К      | КК    |
| 3      | Параллельная обмотка возбуждения . .                               | Ш      | ШШ    |
| 4      | Обмотка независимого возбуждения . .                               | Н      | НН    |
| 5      | Промежуточный вывод последовательной обмотки возбуждения . . . . . |        | С     |

Задача проверки правильности соединения целых обмоток друг с другом и с доской зажимов сводится к определению их начал и концов. При этом необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Начало обмотки якоря (Я1) нормально лежит на щетках той полярности, к которой присоединяется положительный провод сети, вне зависимости от того, работает машина в режиме генератора или двигателя (рис. 2-2).

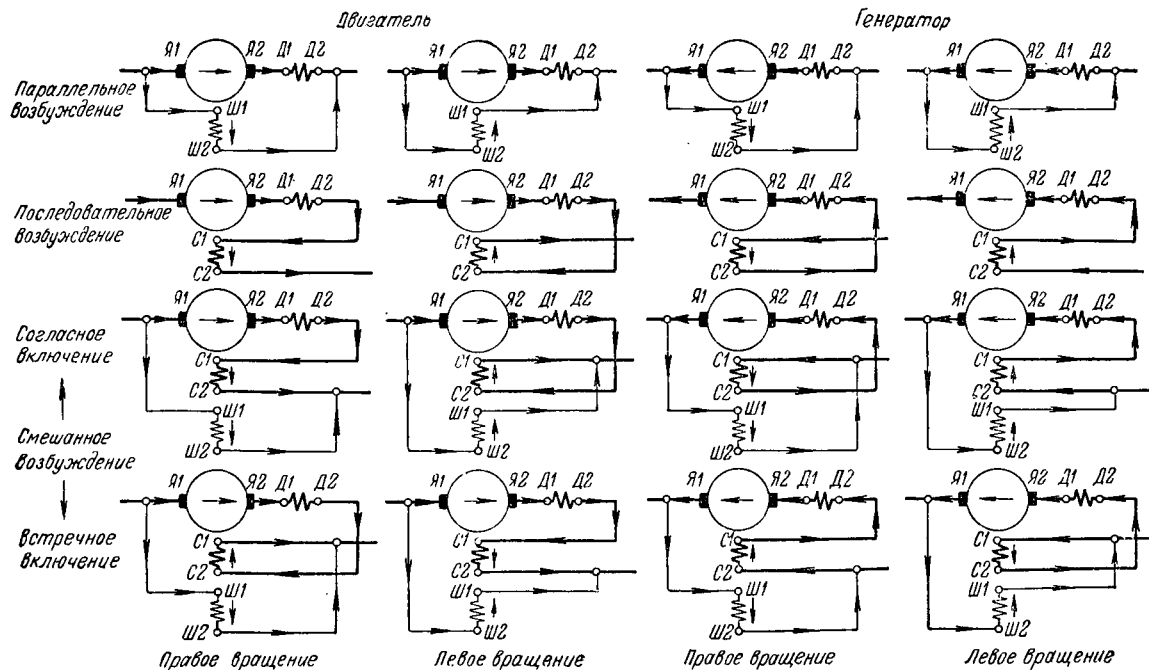


Рис. 2-2. Обозначения выводов обмоток при различных системах возбуждения, режимах и направлениях вращения.

2. В якорах с барабанными обмотками щетки на коллекторе располагаются примерно против середины главных полюсов; определение полярности щеток по отношению к полярности главных полюсов может быть произведено на основании табл. 2-3.

Таблица 2-3

| Тип обмотки | Направление хода обмотки | Направление вращения |          |          |          |
|-------------|--------------------------|----------------------|----------|----------|----------|
|             |                          | Правое               |          | Левое    |          |
|             |                          | <i>N</i>             | <i>S</i> | <i>N</i> | <i>S</i> |
| Петлевая    | Прямоходовая             | +                    | —        | —        | +        |
|             | Обратноходовая           | —                    | +        | +        | —        |
| Волновая    | Прямоходовая             | —                    | +        | +        | —        |
|             | Обратноходовая           | +                    | —        | —        | +        |

Для иллюстрации правила, заключающегося в табл. 2-3, на рис. 2-3, 2-4, 2-5 и 2-6 представлены четыре схемы обмоток, соответствующие типам, приведенным в табл. 2-3, с одним и тем же числом активных сторон секций; стрелки, нанесенные на лобовых частях, позволяют проследить сложение э. д. с. и полярность щеток.

Нормально применяемыми типами обмоток являются петлевая прямоходовая и волновая обратноходовая; в отдельных случаях встречается волновая прямоходовая; петлевая обратноходовая применяется исключительно редко.

3. При переходе от режима двигателя к режиму генератора или обратно с сохранением направления вращения направление тока во всех обмотках последовательного питания, в том числе и в якоре, меняется на обратное, а во всех обмотках параллельного или независимого питания — сохраняется без изменения.

4. При перемене направления вращения с сохранением режима двигателя или генератора изменяется на обратное либо направление тока во всех обмотках последовательного питания, либо направление тока во всех обмотках параллельного или независимого питания главных полюсов.

5. Если переходить от полюса к полюсу по направлению вращения машины, то после каждого главного полюса следует добавочный полюс той же полярности при работе в режиме двигателя и противоположной полярности при работе в режиме генератора.

6. Один из выводов обмотки добавочных полюсов соединяется с щеточной траверзой наглухо; это соединение, будучи однажды правильно установлено, не нарушается, если только траверза остается на своем месте (т. е. не поворачивается на одно полюсное деление в какую-либо сторону). В тех случаях,

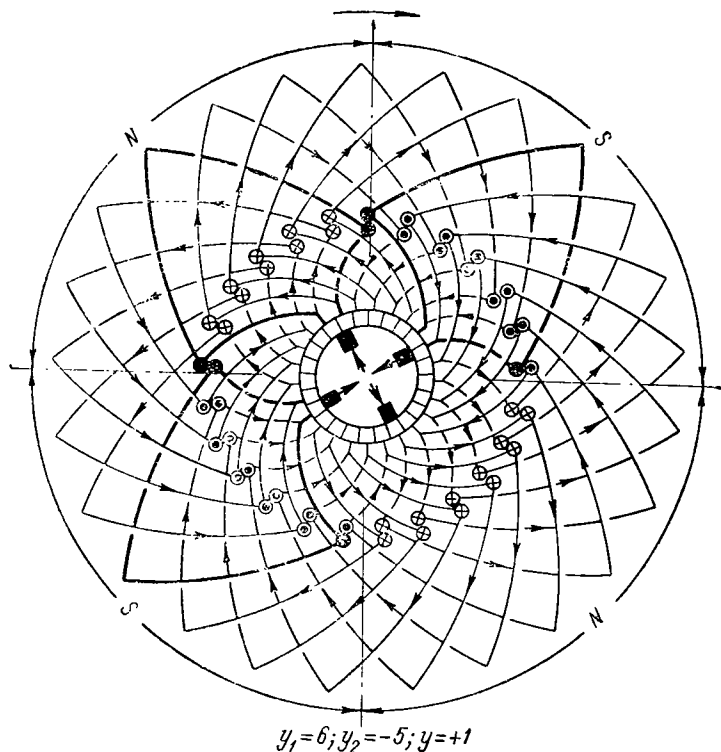


Рис. 2-3. Петлевая прямоходовая обмотка.

когда обмотка добавочных полюсов разбивается на две равные части, включаемые по обе стороны якоря, как это делается иногда для облегчения борьбы с радиопомехами, соединение производится также наглухо в порядке

Д1 — Д2 — Я1 — Я2 — Д3 — Д4.

7. Катушки отдельных обмоток последовательной цепи не перемежаются между собой; все катушки каждой обмотки сна-

чала соединяются друг с другом, а затем уже производятся соединения между целыми обмотками. Единственным исключением из этого правила является компенсационная обмотка, каждая катушка которой соединяется последовательно с катушкой охватываемого ею добавочного полюса.

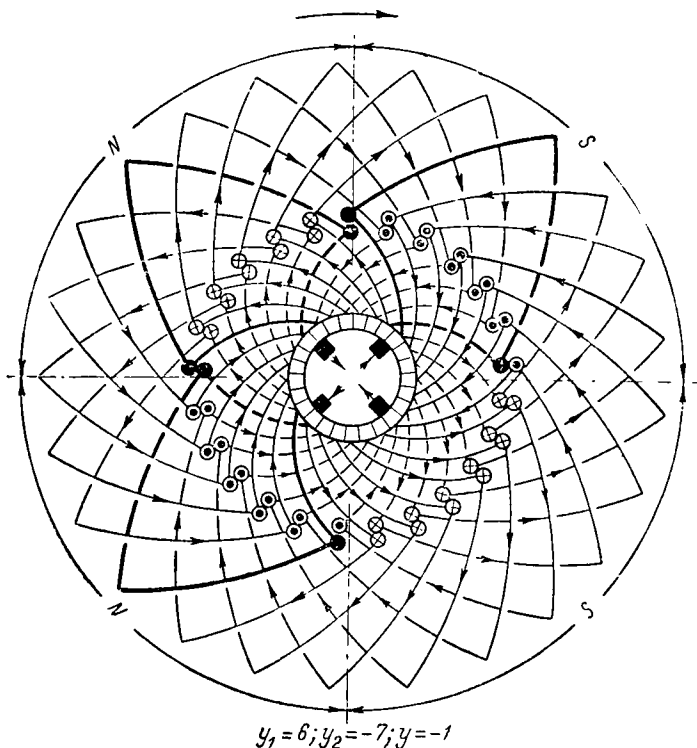


Рис. 2-4. Петлевая обратнoходовая обмотка.

8. Во всякой машине можно переменить местами обозначения начал и концов всех обмоток одновременно.

Если в результате проверки соединений между отдельными катушками обмоток стала известной зависимость полярности полюсов, создаваемой всеми обмотками, от направления тока в них и, кроме того, известен тип обмотки якоря, то определение начал и концов всех обмоток не представляет затруднений, не нуждается в дополнительных опытах и требует лишь внима-

тельности. Но если зависимость полярности полюсов от направления тока в них неизвестна или неизвестен тип обмотки якоря, то необходимо произвести дополнительные опыты. В отличие от опытов по проверке правильности соединений внутри

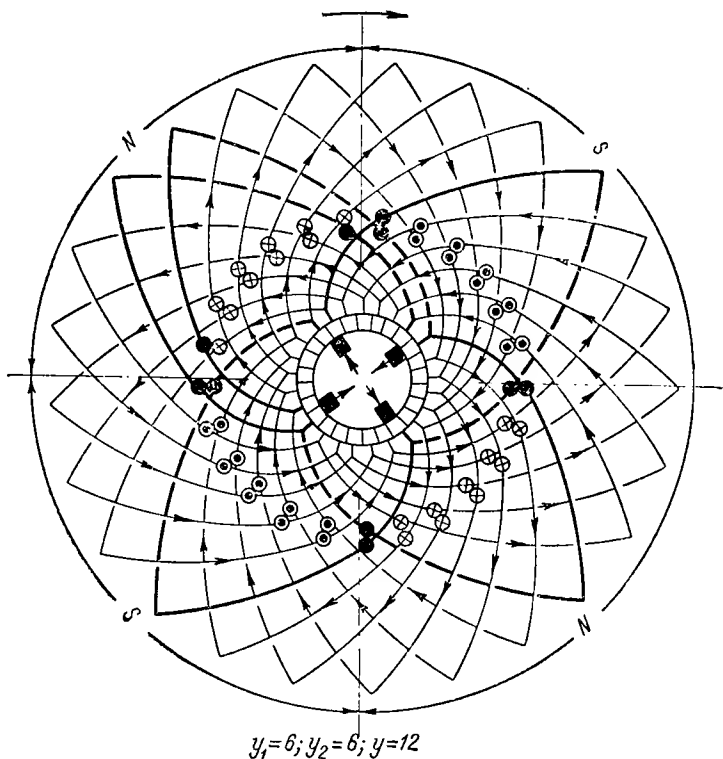


Рис. 2-5. Волновая обратногоходовая обмотка.

каждой обмотки, эти опыты целесообразнее производить в собранной машине, хотя в отдельных случаях они могут быть произведены и в несобранной машине.

Пусть  $N$  представляет полное число активных сторон секций данной обмотки (включая и мертвые секции, если они имеются) и  $p$  есть число пар полюсов машины; тогда, обозначив через  $y_1$  шаг обмотки по активным сторонам секций со стороны,

противоположной коллектору, и через  $y_2$  — шаг со стороны коллектора, можно сформулировать правило:

а) петлевая обмотка является прямоходовой, если  $y_1 > y_2$ , и обратноходовой, если  $y_1 < y_2$ ;

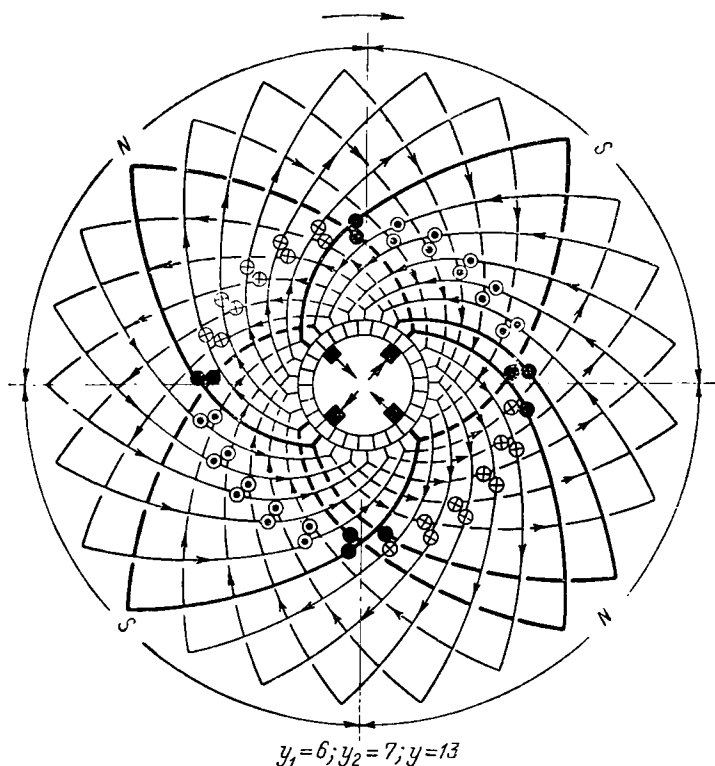


Рис. 2-6. Волновая прямоходовая обмотка.

б) волновая обмотка является прямоходовой, если

$$2p(y_1 + y_2) > N,$$

и обратноходовой, если

$$2p(y_1 + y_2) < N.$$

Но когда данные обмотки отсутствуют, определить тип обмотки посредством осмотра не представляется возможным, и

приходится прибегнуть к одному из нижеследующих способов определения типа обмотки.

**1. Способ питания якоря током.** Если подвести к неподвижному якорю ток через щетки, то на протяжении каждого полюсного деления во всех проводниках обмотки направление тока будет одним и тем же: на том полюсном делении, против середины которого находятся щетки положительной полярности питания, при петлевой прямоходовой и волновой обратногоходовой обмотках ток направлен от коллектора, а при петлевой обратногоходовой и волновой прямоходовой — к коллектору; на соседних полюсных делениях, против которых стоят щетки отрицательной полярности питания, направления токов в проводниках будут обратными.

Ток в обмотке якоря создает поле реакции, полюса которого расположены посередине между главными полюсами или против добавочных полюсов, если последние имеются. Полярность этого поля определяется направлениями токов в проводниках по правилу буравчика: в первом случае — при нормально принятых типах обмоток, если смотреть на поверхность якоря сверху со стороны коллектора, то левее щеток положительной полярности лежат северные полюса поля реакции, а правее их — южные; во втором же случае — при ненормальных типах обмоток — наоборот, левее щеток положительной полярности лежат южные полюса поля реакции, а правее их — северные.

Таким образом, подав питание в обмотку якоря через щетки, минуя добавочные полюсы, остается лишь определить полярность поля реакции способами магнитной стрелки или пробной катушки причем первый из них удобнее в машинах без добавочных полюсов, а второй, в особенности с применением флюксметра и отключения питания, — в машинах с добавочными полюсами.

**2. Способ вращения якоря.** Если подать в обмотку главных полюсов питание и определить их полярность, а затем присоединить к щеткам чувствительный магнитоэлектрический прибор и повернуть якорь от руки, ломом или краном, в зависимости от его размеров, или вращать его посредством постороннего двигателя, то прибор покажет отклонение, по которому можно судить о полярности э. д. с., индуцированной в якоре. Сопоставление этой полярности с полярностью главных полюсов и направлением вращения позволяет определить тип обмотки на основании табл. 2-3.

**3. Способ пуска в режиме двигателя.** Если при известной полярности возбужденных главных полюсов подать питание в якорь через щетки так, что против северных полюсов будут находиться щетки положительной полярности, то якорь придет во вращение: правое (смотря со стороны



приводного конца вала!) — в случае нормально применяемых типов обмоток, и левое — в случае ненормальных типов.

**4. Способ отключения питания добавочных полюсов.** Если подать питание в обмотку добавочных полюсов, то при его отключении в обмотке якоря будет индуцироваться э. д. с., которая может быть обнаружена магнитоэлектрическим прибором, присоединенным к щеткам.

Под северным добавочным полюсом направление э. д. с. в проводниках якоря при отключении питания будет, если смотреть на поверхность якоря сверху и со стороны коллектора: по левую сторону от добавочного полюса — от коллектора, по правую — к коллектору. При обмотках нормально применяемых типов положительными будут щетки, лежащие правее северных добавочных полюсов.

Коль скоро тип обмотки якоря определен и известна полярность, образуемая всеми обмотками главных и добавочных полюсов, задача проверки соединений между обмотками может считаться решенной.

**Пример.** Требуется проверить соединения между обмотками генератора с добавочными полюсами и со смешанным возбуждением, имеющего левое вращение. Обмотка якоря — волновая обратноточковая; полярность главных полюсов, создаваемая параллельной обмоткой возбуждения, проверена опытом, полярность же их, создаваемая последовательной обмоткой возбуждения, а также полярность, создаваемая обмоткой добавочных полюсов, определены осмотром.

В двигателе, имеющем правое вращение, соединения обмоток должны быть выполнены, согласно определениям ГОСТ 183-55, в порядке:

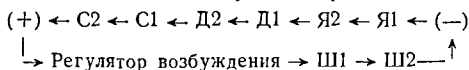
$$\begin{array}{l}
 (+) \rightarrow Я1 \rightarrow Я2 \rightarrow Д1 \rightarrow Д2 \rightarrow С2 \rightarrow С1 \rightarrow (-) \\
 \quad \downarrow \\
 \quad \rightarrow \text{Регулятор возбуждения} \rightarrow Ш1 \rightarrow Ш2 \rightarrow \uparrow
 \end{array}$$

Если, не изменяя направления вращения, перевести двигатель в режим генератора, то все эти соединения сохраняются. При этом направление тока в якоре изменяется на обратное; но вместе с этим изменяется и направление тока в обмотках добавочных полюсов и последовательной обмотке. Если соединения параллельной обмотки возбуждения остались прежние, то и направление тока в ней сохранилось; поэтому последовательная обмотка возбуждения, которая в режиме двигателя размагничивала машину, теперь, после изменения направления тока, намагничивает ее. Направления токов в обмотках при этом будут следующими:

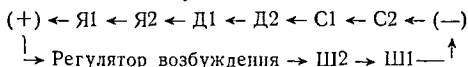
$$\begin{array}{l}
 (+) \leftarrow Я1 \leftarrow Я2 \leftarrow Д1 \leftarrow Д2 \leftarrow С2 \leftarrow С1 \leftarrow (-) \\
 \quad \downarrow \\
 \quad \rightarrow \text{Регулятор возбуждения} \rightarrow Ш1 \rightarrow Ш2 \rightarrow \uparrow
 \end{array}$$

Эти соединения вполне удовлетворяли бы требованиям, если бы машина должна была иметь правое вращение; но по условию генератор должен иметь левое вращение. Если же изменить направление вращения, то направления токов в якоре, обмотке добавочных полюсов и последовательной обмотке возбуждения изменятся на обратные, что потребует изменения подключения машины к сети; кроме того, последовательная обмотка возбуждения, до сих

пор намагничивавшая машину, теперь будет ее размагничивать. Поэтому соединения должны быть изменены следующим образом:



Вместо изменения направлений токов в обмотках последовательной цепи можно изменить направление тока в параллельной обмотке возбуждения, установив направление тока в последовательной обмотке возбуждения таким, чтобы она намагничивала машину:



Порядок чередования обмоток в последовательной цепи не играет роли; единственное условие, налагаемое на него, состоит в том, что соединение якоря с обмоткой добавочных полюсов, будучи однажды установлено, в дальнейшем не должно нарушаться ни при каких изменениях схемы. В обоих вариантах последовательная обмотка возбуждения может быть перенесена с сохранением направления тока на противоположную сторону якоря.

Выбор варианта соединений определяется в основном удобством монтажа; но, кроме того, в отдельных случаях он может зависеть от существующего в машине остаточного намагничивания, если последнее по местным условиям не может быть изменено, например по причине отсутствия подходящего источника постоянного тока. Для того чтобы в машине имело место самовозбуждение, направление тока в параллельной обмотке возбуждения должно быть таким, при котором она усиливает поле остаточного намагничивания, а не ослабляет его.

При начале проверки любая полярность щеток может быть условно принята за положительную. Из табл. 2-3 следует, что при данном типе обмотки якоря против щеток положительной полярности должны находиться южные главные полюса; следовательно, может быть отмечен тот вывод параллельной обмотки возбуждения, который должен быть присоединен к положительному зажиму питания, чтобы параллельная обмотка возбуждения создала нужную полярность главных полюсов.

Эта же полярность главных полюсов должна создавать и последовательная обмотка возбуждения, что дает возможность отметить тот ее вывод, в который ток должен входить.

Наконец, принимая во внимание, что в генераторе после каждого главного полюса по направлению вращения машины должен следовать добавочный полюс противоположной полярности, можно отметить тот вывод обмотки добавочных полюсов, в который должен входить ток для образования нужной полярности.

Вся эта маркировка является условной; с одинаковым успехом можно ее начать от щеток отрицательной полярности. Поэтому, если окажется необходимым по причине наличия определенного остаточного намагничивания, то обозначения начал и концов всех обмоток можно поменять местами, чтобы привести маркировку в соответствие с ГОСТ 183-55.

Во всех тех опытах, где требуется питание обмоток последовательной цепи машины (якорь, последовательная обмотка возбуждения, обмотка добавочных полюсов и т. д.), очень удобно подавать это питание от генератора низкого напряжения типа применяемых для питания электролитических ванн; генератор на 6 в и 1000 а может удовлетворить при этом всевозможным случаям, до крупнейших машин включительно. Так как

проверка соединений является далеко не единственной областью применения такого генератора, при испытаниях электрических машин крайне желательно иметь его в комплекте с соответствующим двигателем на общей фундаментной плите, допускающей переноску агрегата непосредственно к месту работы.

Но если по местным условиям не представляется возможным обеспечить питание обмоток постоянным током достаточной величины для получения надежных показаний применяемых приборов, можно предложить очень простой способ проверки правильности соединения обмотки добавочных полюсов с якорем посредством переменного тока, который состоит в следующем: в цепь, составленную из обмотки добавочных полюсов (и компенсационной обмотки, если она имеется) и обмотки якоря, подается питание переменным током и по способу вольтметра и амперметра измеряется полное (кажущееся) сопротивление этой цепи. Затем либо щеточная траверза поворачивается на одно полюсное деление, либо, если это нежелательно, обмотка якоря и обмотка добавочных полюсов включаются в противоположном направлении по отношению друг к другу, и измерение полного сопротивления повторяется. Правильным соединением обмоток является то, при котором измеренное сопротивление имеет меньшую величину, так как при нем магнитные потоки, создаваемые обеими обмотками, направлены навстречу друг другу. В машинах средних мощностей отношение измеренных таким образом сопротивлений достигает примерно 2. В качестве источника переменного тока может быть с успехом использован сварочный трансформатор с реактором для регулирования тока или даже трансформатор для питания переносных ламп низкого напряжения.

Аналогичным образом может быть произведена проверка правильности включения последовательной обмотки возбуждения; однако для этого следует сдвинуть щетки на половину полюсного деления в произвольную сторону и произвести такие же два измерения полного сопротивления, как и в предыдущем случае. То из измерений, которое дает меньшее значение полного сопротивления, указывает, что при нем полярность, образуемая последовательной обмоткой возбуждения, совпадает с полярностью правильно включенной обмотки добавочных полюсов. В соответствии с требованиями каждого данного случая, на этом основании можно судить, каково должно быть включение последовательной обмотки возбуждения.

**Пример.** Требуется установить правильность включения обмотки главных полюсов двигателя с последовательным возбуждением и с добавочными полюсами, имеющего правое вращение. Проверка включения обмотки добавочных полюсов показала, что оно выполнено правильно.

При смещении щеток на половину полюсного деления против направления вращения двигателя, т. е. в данном случае — против часовой стрелки,

если смотреть со стороны приводного конца вала, ось поля якоря должна совпасть по направлению с осью поля главных полюсов и оба поля должны быть направлены навстречу друг другу, так как в двигателе каждому добавочному полюсу предшествует главный полюс той же полярности.

Поэтому при данном положении щеток правильным будет являться то соединение последовательной обмотки возбуждения с щеточной траверзой, при котором измеренное полное сопротивление будет меньшим.

По окончании опыта щетки должны быть возвращены в исходное положение.

## 2-4. Осмотр поверхности коллектора

Состояние поверхности коллектора является очень важным фактором, влияющим на работу машины; поэтому перед началом испытания необходимо убедиться в том, что оно соответствует следующим требованиям:

1) коллектор не должен иметь биения, препятствующего правильной работе щеточного аппарата;

2) все образующие его рабочей поверхности должны быть прямолинейны;

3) изоляция между пластинами не должна выступать над рабочей поверхностью коллектора;

4) на рабочей поверхности не должно быть заметных следов реза, выбоин, пятен лака, краски и т. п., а также нагара от предшествовавшей неудовлетворительной работы щеточного аппарата;

5) пластины не должны иметь острых краев, заусениц и т. д., особенно в машинах высокого напряжения и больших мощностей;

6) промежутки между пластинами должны быть совершенно чисты — в них не должно быть металлических стружек или опилок, пыли или кусочков графита от щеток, масла, лака, канифоли и олова от пайки и т. д.

Биение коллектора может носить различный характер. Наименее опасный вид биения происходит от эксцентричности поверхности коллектора по причине недостаточно правильной обточки его самого или его посадочных поверхностей. Чем выше окружная скорость коллектора, тем меньше величина допустимого биения этого рода. В быстроходных машинах с окружными скоростями до 45—55 м/сек, как, например, возбудители турбогенераторов, предельной допустимой величиной такого биения нужно считать 0,02—0,025 мм, а при еще более высоких окружных скоростях — и того менее. Напротив, в тихоходных машинах, как возбудители гидрогенераторов, крупные прокатные двигатели, дизель-генераторы, биение, легко заметное простым глазом, следовательно достигающее по крайней мере нескольких десятых долей миллиметра, никакого вредного влияния на работу не оказывает.

Значительно более опасно биение, обусловленное местными нарушениями цилиндричности рабочей поверхности вследствие выступания или, наоборот, провала отдельных пластин или целых групп пластин, так как оно свидетельствует о серьезных

дефектах в изготовлении коллектора и крайне трудно устранимо; при работе машины оно вызывает образование местных нагаров из-за искрения щеток и ведет к разрушению щеточного аппарата.

На рис. 2-7 представлены щетки, арматура которых была совершенно разрушена вследствие выступания некоторых пластин коллектора: медная накладка разломана по перегибам, заклепки, крепящие ее к телу щетки, срезаны и вышли из своих гнезд.

Иногда встречается вид биения, представляющий нечто промежуточное между упомянутыми двумя: вследствие неправильностей обработки, коллектор принимает форму,

Рис. 2-7. Разрушение арматуры щеток вследствие биения коллектора.

му, приближающуюся к многограннику с закругленными углами, например, к шестиграннику. Такое биение также ведет к разрушению щеток и потому не может быть допущено.

На ходу машины биение коллектора проявляется в вибрации щеток; при низких и средних скоростях вращения — примерно до 750 об/мин — отчетливо ощущается разница между эксцентricностью коллектора и местными нарушениями его поверхности: первая воспринимается как непрерывное плавное колебательное движение щеток в обоймах щеткодержателей, вторые проявляют себя легко ощутимыми резкими ударами.

Шум от трения щеток на поверхности коллектора также имеет в этих двух случаях различный характер: в первом он ощущается как правильно вибрирующий, то возрастающий по интенсивности, то убывающий с каждым оборотом коллектора; во втором он принимает характер дроби от отдельных резких ударов на фоне более или менее равномерного общего шуршащего звука.

При более высоких скоростях вращения как осязательные, так и слуховые восприятия становятся труднее различимыми, чему способствует не только увеличение частоты колебаний, но и примешивание общей вибрации машины и шума вентиляционного происхождения, на фоне которых вибрация и шум щеток теряются.

Напротив, при самых низких скоростях вращения, например при выбеге машины, осязательные ощущения от эксцентричности и от нарушений правильности поверхности резко различаются; слуховое восприятие первой постепенно исчезает, в то время как вторые почти до самой остановки проявляются дробным стуком щеток.

Следует заметить, что оба вида биения коллектора могут иметь место не по всей его длине; в особенности это относится ко второму виду, который зачастую наблюдается преимущественно по концам коллектора.

От вибрации щеток, обусловленной нарушением цилиндричности коллектора, следует отличать вибрацию, происходящую от неблагоприятного соотношения коэффициента трения, кинематических особенностей щеткодержателей, окружной скорости, давления на щетки и отношения ширины щетки к ширине пластины коллектора, при котором наступает резонанс.

Этот вид вибрации разрушительно действует на сами щетки; в слабо выраженных случаях на боковой поверхности щетки отпечатываются все неровности внутренней поверхности обоймы щеткодержателя; в более ярко выраженных случаях наступает сильная выработка боковых поверхностей щетки, которая приобретает форму так называемого «сапожка» (рис. 2-8).

Эта вибрация сопровождается резким визжащим шумом высокого тона; характерным признаком ее является весьма заметная зависимость этого шума от нагрузки щеток током. Поскольку данное явление характерно для щеток с высоким значением коэффициента трения, а величина последнего падает с увеличением плотности тока под щеткой, обычно по мере увеличения нагрузки машины шум затихает; так, например, при внезапном включении нагрузки воспринимается резкое уменьшение шума, вновь появляющегося при ее отключении. Совершенно такое же исчезновение шума происходит при легком смазывании поверхности коллектора парафином или каким-нибудь жировым веществом, что, впрочем, оказывает действие лишь в течение непродолжительного времени и загрязняет коллектор.

Прямолинейность образующих коллектора нарушается вследствие выработки пластин щетками, а в очень плохо работающих машинах — из-за выгорания пластин от сильного искрения. Причиной этого может служить также неправильная обработка коллектора. Прямолинейность проверяется прикладыванием к пластинам поверочной линейки — «на просвет». Наличие

заметных нарушений нежелательно потому, что в случае осевой игры вала ухудшается контакт щеток с поверхностью коллектора, вследствие чего возрастает склонность машины к искрению.

Износ меди коллектора и изоляции между пластинами неодинаков. Из-за большей твердости слюды она изнашивается меньше; по этой причине после некоторого периода работы изоляция начинает выступать над рабочей поверхностью, что ухудшает работу щеточного аппарата и способствует возникновению

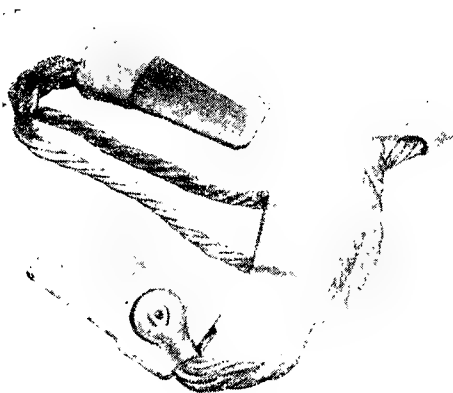


Рис. 2-8. Разрушение щеток вследствие вибрации в обоймах щеткодержателей.

искрения. Во избежание этого изоляция между пластинами выбирается при помощи специального инструмента на некоторую глубину, тем большую, чем больше сам коллектор, в среднем на 1—2 мм.

Эта операция, носящая название «продоразивания» коллектора, требует очень тщательного выполнения; слюда должна быть удалена по всей своей толщине на глубину продорожки, как это показано на рис. 2-9, а; если же часть слюды осталась, как на рис. 2-9, б и в, то после некоторого изнашивания пластин она будет выступать над ними так же, как и при непродорозженном коллекторе.

Поэтому перед началом испытания коллектор должен быть осмотрен при сильном местном освещении; такой осмотр не представляет особых трудностей, так как медь пластин на боковых стенках дорожек заметно отличается своим темным цветом от светлосерой слюды. Заодно при этом проверяется чистота дорожек, в особенности на предмет отсутствия тонких стружек меди,

получающихся при продоразживании, и медной пыли от шлифовки коллектора.

В машинах, склонных к образованию кругового огня, к которым относятся главным образом машины крупных мощностей высокого напряжения, следует обращать внимание на то, чтобы после продоразживания пластины не имели острых краев; для этого на них срезаются небольшие фаски, как показано на рис. 2-9, *а*. При осмотре коллектора в таких машинах нужно обращать особое внимание на то, чтобы на краях пластин нигде не было заостренных заусениц и чтобы концы пластин на краю коллектора были закруглены; наличие всяких заострений

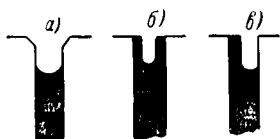


Рис. 2-9. Удаление слюды между пластинами коллектора: *а* — правильно; *б* и *в* — неправильно.



Рис. 2-10. Заваливание краев пластин коллектора при шлифовке.

облегчает образование кругового огня вследствие повышения градиента потенциала пластин. Коллекторы машин низкого напряжения, если они правильно обработаны, в снятии фаски не нуждаются.

Рабочая поверхность коллектора должна быть чистой и достаточно ровной; однако ее чистоту не следует переоценивать. Многочисленные исследования показывают, что после полной приработки поверхности коллектора щетками чистота ее достигает в среднем класса 7 по шкале ГОСТ 2789-51, изредка лишь переходя в класс 8; следовательно, нет никакого смысла добиваться более высокого класса чистоты поверхности при ее обработке; в машинах с не очень большими окружными скоростями коллектора можно даже ограничиться классом 6.

Между тем совершенно не безразлично, каким способом произведена обработка поверхности коллектора. Если обточка производится при слишком большой подаче и для выведения следов резца применяется затем шлифовка стеклянной бумагой, полотном или порошкообразными абразивными материалами или пастами, нанесенными на кожу или ткань, то коллектор теряет цилиндричность поверхности, так как края его пластин заваливаются по направлению к дорожкам, как это в увеличенном виде показано на рис. 2-10, и тем больше, чем мягче подкладки под шлифующий материал.



Щетки на подобном коллекторе склонны к вибрации и к искрению с набегающего края, которое, впрочем, само по себе совершенно безвредно, так как не портит поверхности коллектора нагаром.

Не вдаваясь в подробности технологии обработки поверхности коллектора, следует отметить, что наилучший результат дает обточка с очень малой подачей (до 0,05 мм) без последующей шлифовки или шлифовка карборундовым кругом либо бруском. Хороший результат в отношении сохранения цилиндричности дает также шлифовка пемзой, но ее следует избегать в случае применения щеток мягких и легко изнашивающихся марок, так как зерна пемзы, въедаясь в поверхность пластин, чрезвычайно сильно изнашивают такие щетки.

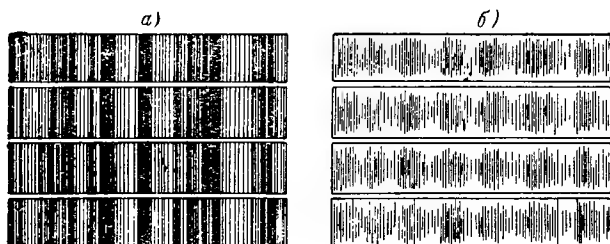


Рис. 2-11. Натиранье поверхности коллектора щетками: а — при строго цилиндрическом коллекторе; б — при заваленных краях пластин.

После самой кратковременной работы с наложенными щетками характер обработки проявляется совершенно объективно: при правильной обработке щетки натирают на пластинах следы, равномерно покрывающие всю их ширину от края до края, как показано на рис. 2-11, а; при неправильной — следы щеток более или менее не доходят до краев пластин, как на рис. 2-11, б. Условия работы щеточного аппарата получаются более естественными при первом виде поверхности; в работающей машине, если только этому не препятствует искрение под щетками, с течением времени картина рис. 2-11, б переходит в картину рис. 2-11, а вследствие износа пластин.

Наличие на рабочей поверхности отдельных продольных царапин, например образующихся при недостаточно аккуратном продоразживании вследствие срыва инструмента, не является препятствием к правильной работе коллектора, если только сглажены выступающие над поверхностью края царапин.

## 2-5. Проверка правильности схемы обмотки якоря, отсутствия обрывов и замыканий в ней

В некоторых случаях не представляется возможным подвергнуть испытанию готовую машину или ее часть на заводе-изготовителе, например отдельные якоря, запасные или ремонтные, когда к ним не удастся подобрать подходящей магнитной системы.

Во всех подобных случаях, чтобы получить хотя бы примерное представление о доброкачественности выполнения обмотки якоря, приходится производить проверку правильности ее схемы и отсутствия в ней обрывов и коротких замыканий секций или витков.

Такая проверка состоит в измерении сопротивлений отдельных секций: при петлевой обмотке — между каждыми двумя соседними пластинами коллектора, а при волновой — между пластинами, номера которых разнятся на величину полного шага обмотки по коллектору.

В случае волновой обмотки нужно предварительно проверить шаг, для чего достаточно найти пластины, между которыми измеренное сопротивление является наименьшим; расстояние между ними примерно равно двойному полюсному делению. Отступление на одну пластину в любую сторону дает сразу возрастание измеренного сопротивления в несколько раз, кроме случая четырехполюсной обмотки, в которой две пластины, лежащие рядом, дают одну и ту же величину сопротивления с пластиной, находящейся на противоположном конце диаметра коллектора.

Собственно говоря, в рассматриваемом случае измеряется сопротивление не одной секции, а сложного контура, одну из параллельных ветвей которого составляет данная секция, а другую — вся остальная часть обмотки, которая, в свою очередь, при наличии уравнительных соединений состоит из ряда параллельных ветвей, к тому же сложно соединенных друг с другом.

Однако в самых худших условиях сопротивление секции все же в несколько раз меньше, чем сопротивление всей остальной части обмотки; поэтому всякие резкие отступления ее сопротивления как в большую сторону — например при нарушенной пайке соединений, не говоря уже об обрыве, так и в меньшую сторону — при коротком замыкании всей секции или ее части — отчетливо обнаруживается этим способом. Мало того, когда не все секции совершенно одинаковы (например более длинные или более короткие лобовые части при переходе из одного паза в другой), это различие ясно обнаруживается в виде правильного периодического изменения измеренной величины по окружности коллектора.

При простой петлевой обмотке с любым числом полюсов, не имеющей уравнительных соединений, а также при любой однократно-замкнутой обмотке с нечетным числом пар полюсов опыт может быть видоизменен следующим образом: питание обмотки якоря током подается через две пластины коллектора, расположенные по концам какого-либо его диаметра; падение напряжения на отдельных секциях измеряется между каждыми двумя соседними пластинами посредством милливольтметра с игольчатыми щупами. Такой способ имеет смысл применять в тех случаях, когда нет двойных щупов для одновременного подведения тока и снятия падения напряжения или когда для создания доступного для измерения падения напряжения на секции требуется подводить к обмотке якоря настолько значительный ток, что пользование двойными щупами становится затруднительным. При четном числе пар полюсов точки подвода питания должны быть удалены одна от другой на нечетное число полюсных делений; желательно, чтобы по крайней мере одна из них совпадала с точкой подсоединения уравнителей.

Исправность уравнительных соединений может быть проверена измерением сопротивлений между пластинами, лежащими друг от друга на расстоянии шага уравнительных соединений по коллектору, который равен частному от деления общего числа пластин на число пар полюсов. Если обмотка имеет полное число уравнительных соединений, то измеренное сопротивление между любыми двумя такими пластинами должно быть одним и тем же, и всякое заметное увеличение его против среднего уровня свидетельствует о нарушенной пайке или обрыве. Если же обмотка снабжена только частью возможных соединений, то измеренные сопротивления будут регулярно чередоваться между некоторым наименьшим значением, соответствующим измерению между пластинами, снабженными уравнительными соединениями, и некоторым наибольшим, соответствующим измерению между пластинами, наиболее удаленными от снабженных соединениями. И в этом случае легко установить сопротивление, свидетельствующее о доброкачественности соединений.

При проведении перечисленных опытов в собранной машине все щетки должны быть подняты.

Конечно, указанные опыты не дают полной гарантии в исправности обмотки; при подъеме напряжения и принятии нагрузки в обмотке вращающегося якоря могут обнаружиться замыкания и обрывы, которых до этого не было. Тем не менее проверка позволяет обнаружить наиболее очевидные из них.

Кроме того, описанные измерения помогают проверить правильность выполнения обмотки, что особенно важно в якорях со сложными обмотками, в особенности при неполных количествах уравнителей, ошибки в присоединении которых всегда возможны,

**Пример.** Запасный якорь возбuditеля гидрогенератора был выпущен заводом-изготовителем без испытания на ходу; на нем была только произведена проверка падений напряжения между соседними пластинами, показавшая отсутствие обрывов и замыканий. После установки на станции было обнаружено, что его напряжение ровно в пять раз меньше ожидаемого.

Якорь имел следующие данные: число полюсов  $2p = 16$ , число секций и пластин коллектора  $K = 534$ , обмотка волновая двухходовая однократно-замкнутая с числом параллельных ветвей  $2a = 4$ , с 13 уравнительными соединениями второго рода, должна была иметь шаги:  $y_1 = 34$ ,  $y_2 = 33$ .

При расследовании выяснилось, что ошибочно был взят шаг  $y_2 = 34$ , все же остальное, в том числе и уравнители, было выполнено правильно. В результате ошибки обмотка распалась на две пятнходовых обмотки, т. е. превратилась в двукратно-замкнутую обмотку с числом параллельных ветвей  $2a = 20$ , в пять раз большим заданного.

Ошибка была бы обнаружена своевременно, если бы производилась проверка шага обмотки, которая сразу показала бы, что наименьшее сопротивление получается между пластинами 1 и 69, а не 1 и 68, как должно быть.

## 2-6. Установка щеток в нейтральное положение

Под нейтральным в машинах постоянного тока понимается такое положение щеток, при котором э. д. с. ненагруженного якоря достигает при прочих равных условиях наибольшей величины.

На таком определении основывается простейший способ установки щеток в нейтральное положение. Именно, машина приводится во вращение с постоянной скоростью при помощи какого-либо двигателя; при поддержании постоянства тока возбуждения, подаваемого от постороннего источника, отыскивается такое положение щеток, при котором напряжение на них достигает наибольшей величины.

Однако чувствительность способа неудовлетворительна; напряжение на щетках поблизости от нейтрального положения очень мало зависит от небольших смещений с него, вследствие чего крайне трудно точно уловить наибольшее значение напряжения.

Поэтому целесообразнее положить в основу другое соображение. Именно, при нейтральном положении щеток э. д. с. трансформации между обмотками главных полюсов и неподвижного якоря должна быть равна нулю, так как это свидетельствует о полной уравновешенности всех частей обмотки якоря по отношению к полю главных полюсов, при которой уменьшающее влияние встречно действующих э. д. с. во вращающемся якоре сведено к минимуму. Поэтому если к щеткам присоединить чувствительный магнитоэлектрический прибор, а в обмотку главных полюсов подавать толчками питание от постороннего источника постоянного тока (рис. 2-12), то при нейтральном положении щеток прибор не должен давать отклонений.

Всякое смещение щеток с нейтрального положения будет вызывать отклонение прибора при включении питания в одну сторону, а при отключении — в другую, и тем большее, чем больше это смещение. Отклонения прибора при отключении питания получаются более отчетливыми, потому что операция от-

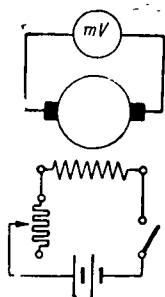


Рис. 2-12. Схема для установки щеток в нейтральное положение.

ключения менее подвержена всяким случайностям, чем операция включения. Поэтому удобно учитывать отклонения именно при отключении. Направление этих отклонений зависит от того, в какую сторону смещены щетки с нейтрального положения.

Поставив щетки предварительно на глаз против середины главных полюсов, следует закрепить траверзу в этом положении и, определив направление отклонений прибора, запомнить их величину. После этого нужно слегка передвинуть щетки в какую-либо сторону и снова определить направление отклонений прибора. Если последнее сохранилось, а величина отклонений стала меньше, следует продолжать передвигать щетки в том же направлении до тех пор, пока отклонения прибора не прекратятся. Если же направление отклонений изменилось на обратное, то щетки передвинуты слишком сильно, и надо начать осторожно передвигать их в обратном направлении.

Описанная операция в принципе крайне проста, но осуществление ее наталкивается на некоторые затруднения.

Дело в том, что установка щеток в нейтральное положение производится обычно тогда, когда щетки хотя и притерты к поверхности коллектора, но еще несколько не приработались к ней. Поэтому каждая щетка касается поверхности коллектора в одной-двух точках, расположение которых совершенно случайно и изменяется при малейшем перемещении траверзы или коллектора.

Зачастую наблюдается, что после закрепления траверзы прибор начинает давать более или менее значительные отклонения, которых до закрепления не было. Мало того, если и удалось добиться отсутствия отклонений после закрепления, они могут снова появиться после поворота коллектора на некоторый угол, хотя бы и очень небольшой.

Немыслимо добиться такого положения щеток, даже вполне приработавшихся к поверхности коллектора, при котором отклонения прибора отсутствовали бы вне зависимости от положения коллектора; приходится удовлетворяться таким, при котором отклонения прибора для разных положений коллектора ограничиваются примерно одинаковыми пределами в обе стороны от нуля.

Поэтому после окончательного закрепления траверзы необходимо несколько раз проверить отклонения прибора, ставя коллектор в разные положения; очень важно при этом вращать его всегда в одну и ту же сторону, чтобы избежать опрокидывания щеток вокруг их точек касания с поверхностью коллектора.

Найденное положение щеток нельзя считать окончательным; после хорошей приработки их контактной поверхности оно должно быть еще раз проверено таким же способом, и только после этого нейтральное положение может быть с уверенностью отмечено посредством зарубки на краю траверзы или тонкой черты, наносимой масляной краской заметного цвета.

Напряжение источника постоянного тока для питания обмотки главных полюсов достаточно иметь такое, при котором ток в ней составляет 5—10% от его значения при холостом ходе с номинальным напряжением и номинальной скоростью вращения.

В качестве указателя отклонений следует применять технический магнитоэлектрический милливольтметр или амперметр, отделенный от своего наружного шунта. Очень удобно, когда он имеет нуль в середине шкалы. Применение для этой цели точных приборов нежелательно, так как последние всегда более чувствительны к ударам, которые испытывает подвижная система при резких толчках э. д. с.

При проворачивании якоря рекомендуется размыкать цепь прибора во избежание его повреждения за счет э. д. с. от остаточного намагничивания машины.

Очень точная установка траверзы в нейтральное положение получается при замене двух щеток разных полярностей медными брусками, опиленными по форме щеток, но имеющими на нижней поверхности долотообразный выступ точно по середине ширины. Все остальные щетки при этом должны быть подняты.

Чем дольше прирабатываются щетки, тем ближе их нейтральное положение подходит к найденному. В многополюсных машинах нужно несколько раз переставлять бруски в щеткодержатели разных пальцев или бракетов, что затрудняет установление правильного положения траверзы; зато в небольших двухполюсных машинах с малыми числами пластин коллектора и с одной-двумя щетками на каждой полярности способ этот дает превосходные результаты.

Хорошие результаты при вполне приработанных щетках дает вращение в двух противоположных направлениях в режиме двигателя под нагрузкой со строго неизменными возбуждением, током нагрузки и скоростью вращения; щетки стоят правильно в нейтральном положении, если приложенное к якорю напряжение при этом остается также неизменным. Этот способ пригоден для машин как с параллельным или независимым возбуждением, так и с последовательным возбуждением, при условии,

что щеткодержатели имеют конструкцию, для которой направление вращения безразлично.

## 2-7. Особенности измерения сопротивлений обмоток

Измерение сопротивлений обмоток главных и добавочных полюсов в машинах постоянного тока не отличается какими-либо характерными особенностями, кроме того, что сопротивление обмоток последовательного включения (последовательной обмотки возбуждения, уравнильной обмотки, обмотки добавочных полюсов) обычно имеет очень малые значения; а так как в них нередко содержится большое количество соединений, частично паяных, частично скрепленных болтами, то отступления измеренных значений от расчетных в сторону увеличения за счет плохих контактов в этих соединениях представляют настолько обычное явление, что можно настоятельно рекомендовать перед измерением тщательно осматривать пайки и проверять затяжку болтов. В частности, следует обращать внимание на контакты в соединениях этих обмоток по плоскости разъема в разъемных магнитных системах крупных машин; эти соединения запаиваются после сборки машины.

Совершенно иначе обстоит дело в отношении обмотки якоря. Следует различать, для какой цели производится измерение ее сопротивления. Таких целей может быть в основном три:

1) измерение сопротивления для подсчета коэффициента полезного действия по методу отдельных потерь и расчетного определения изменения напряжения или скорости вращения; это сопротивление в дальнейшем называется *расчетным*.

Для обмотки якоря, имеющей  $2a$  параллельных ветвей, под ним понимается сумма сопротивлений всех ее секций, разделенная на  $(2a)^2$ ;

2) проверка соответствия действительной величины расчетного сопротивления ее значению, полученному при расчете машины;

3) измерение температуры обмотки по методу сопротивления.

В первом случае от измерения требуется получение величины того сопротивления, которым определяется падение напряжения внутри обмотки якоря, когда последняя нагружена током. Это сопротивление никогда не может быть определено правильным образом, так как в работающей машине часть секций обмотки якоря всегда поставлена в ненормальные условия работы тем, что соединенные с ними пластины коллектора коммутируются щетками, причем количество таких секций непрерывно колеблется между некоторыми наибольшим и наименьшим значениями, а токи в них изменяются по законам, трудно поддающимся исследованию; поэтому приходится

принимать величину сопротивления, измеренного в соответствии с его определением. Эта величина выше той, которая фактически участвует в образовании падения напряжения в якоре, что делает результат определения коэффициента полезного действия или изменения напряжения направленным в запас определяемой величины.

1. Для всех обмоток, имеющих число параллельных ветвей  $2a=2$  (простые петлевые двухполюсные обмотки и простые волновые обмотки на все числа полюсов), нужно измерять сопротивление между пластинами, лежащими друг от друга на расстоянии любого нечетного числа полюсных делений коллектора; таким образом, если  $K$  есть полное число пластин коллектора, а  $2p$  — число полюсов машины, то измерение следует производить между любыми двумя пластинами, номера которых отличаются друг от друга на одну из округленных до ближайшего целого числа величин:

$$\frac{K}{2p}; \frac{3K}{2p}; \frac{5K}{2p}; \dots; \frac{(2p-1)K}{2p}. \quad (*)$$

Условные номера пластин вносятся при этом в протокол измерения.

2. В многополюсных петлевых обмотках без уравнительных соединений число параллельных ветвей во время работы машины равно числу полюсов, т. е. всегда больше двух, но при измерении сопротивления можно иметь в такой обмотке только две параллельные ветви, следовательно расчетное сопротивление ее не может быть измерено непосредственно.

Пусть  $L$  и  $M$  — два целые числа, подчиненные условию

$$L + M = K,$$

и пусть  $r_c$  есть сопротивление одной секции обмотки; если производить измерение сопротивления обмотки между пластинами, номера которых отличаются друг от друга на величину  $L$ , то измеренное сопротивление будет равно:

$$r_n = \frac{1}{\frac{1}{Lr_c} + \frac{1}{Mr_c}} = \frac{LM}{L+M} r_c,$$

откуда

$$r_c = \frac{L+M}{LM} r_n = \frac{K}{LM} r_n.$$

Но, согласно определению, расчетное сопротивление

$$r = \frac{Kr_c}{(2a)^2} = \frac{Kr_c}{(2p)^2} = \frac{K^2 r_n}{(2p)^2 LM}.$$



В частности, если  $K$  есть число четное, то можно положить:

$$L = M = \frac{K}{2};$$

это значит, что измерение производится между пластинами, расположенными по диаметру коллектора. Тогда

$$r = \frac{r_n}{p^2}.$$

Если же  $K$  нечетно, то можно положить:

$$L = M - 1 = \frac{K-1}{2},$$

т. е. производить измерение между пластинами, расположенными примерно по диаметру; при этом

$$r = \frac{K^2 r_n}{p^2 (K^2 - 1)} = \frac{r_n}{p^2} \cdot \frac{K^2}{K^2 - 1}.$$

Так как во всякой машине с числом полюсов, превосходящим два, число пластин  $K$  достигает, по крайней мере, нескольких десятков, то дробь

$$\frac{K^2}{K^2 - 1} > 1$$

отличается от единицы не более чем на несколько десятитысячных; таким образом, приравнивание ее единице в самом худшем случае даст ошибку, не превосходящую нормальной погрешности измерения сопротивлений.

3. Не более затруднительным является и тот случай, когда простая петлевая обмотка снабжена уравнительными соединениями первого рода.

Полное число уравнительных соединений первого рода равно числу пластин, приходящихся на одну пару полюсов, так как именно ему равно число различных значений потенциала на коллекторе в любой момент времени. Для того чтобы уравнительные соединения могли быть выполнены, это число должно быть целым:

$$\frac{K}{p} = \text{целое число.}$$

Если число пластин на пару полюсов разлагается на множители, то каждый из них может представлять неполное число равномерно распределенных уравнительных соединений; последнее может быть четным лишь при условии, что число пластин на пару полюсов четно или что на один полюс приходится целое их число.

Если число уравнительных соединений четно, то вне зависимости от того, является ли оно полным или неполным (но с равномерным распределением), к каждой пластине, снабженной уравнительными соединениями, можно подобрать другую, отстоящую от нее точно на одно полюсное деление, т. е. с номером, отличающимся на  $\frac{K}{2p}$ , и также снабженную уравнительными соединениями; с одинаковым успехом расстояние между пластинами может быть взято в любое нечетное число раз бóльшим.

Измерение сопротивления между такими пластинами дает тем более правильный результат, чем меньше загружены токами уравнительные соединения.

В действительности все уравнительные соединения более или менее загружены токами, и произвести расчетным путем оценку того искажения результата измерения, которое вносится этим обстоятельством, вряд ли представляется возможным. Можно лишь полагать, что поскольку сопротивления уравнительных соединений малы по сравнению с сопротивлениями ветвей обмотки, упомянутое искажение результата измерения едва ли превосходит погрешность измерения.

Если число уравнительных соединений первого рода нечетно, что имеет место при полном их числе в случае нечетного  $\frac{K}{p}$ , а при неполном числе и равномерном распределении может быть и в случае четного числа пластин на пару полюсов, имеющего нечетные множители, то ни к какой пластине, снабженной уравнительными соединениями, нельзя подобрать такую, которая отстояла бы от нее на какое-либо нечетное число полюсных делений и была бы также снабжена уравнительными соединениями; действительно, если  $\frac{K}{p}$  нечетно, то на расстоянии полюсного деления от любой пластины оказывается не пластина, а промежуток между двумя пластинами; если же  $\frac{K}{p}$  четно, но число уравнительных соединений нечетно, то хотя на этом месте находится пластина, но к ней не подключены уравнительные соединения.

Как при четном, так и при нечетном числе уравнительных соединений сопротивление обмотки якоря может быть измерено достаточно правильно, если сопротивления уравнительных соединений малы. При нечетном полном числе уравнительных соединений приходится производить измерение между пластинами, номера которых отличаются друг от друга на величины

$$\frac{K}{2p} \pm \frac{1}{2}; \frac{3K}{2p} \pm \frac{1}{2}; \frac{5K}{2p} \pm \frac{1}{2}; \dots; \frac{(2p-1)K}{2p} \pm \frac{1}{2},$$

причем выбор знака (+) или (—) не играет принципиальной роли.

По отношению к измерительному току вся обмотка распадается на две группы параллельных ветвей; одна группа состоит из  $p$  ветвей, содержащих по  $\frac{K}{2p} - \frac{1}{2}$  секций, а другая —

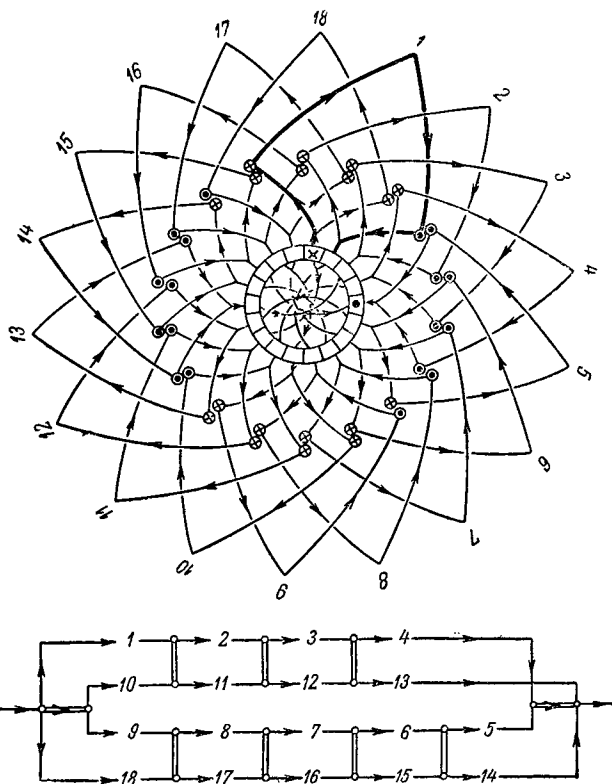


Рис. 2-13. Петлевая обмотка с нечетным полным числом уравнивательных соединений первого рода.

из  $p$  ветвей по  $\frac{K}{2p} + \frac{1}{2}$  секций, как в этом можно убедиться из рис. 2-13, представляющей схему четырехполюсной обмотки с нечетным полным числом уравнивательных соединений.

Если обозначить, как и раньше, сопротивление одной секции через  $r_c$  и полагать, что все они одинаковы, а сопротивлениями

уравнительных соединений можно пренебречь, то сопротивления параллельных ветвей будут:

$$\left(\frac{K}{2p} - \frac{1}{2}\right) r_c = \left(\frac{K}{p} - 1\right) \frac{r_c}{2} \text{ и } \left(\frac{K}{2p} + \frac{1}{2}\right) r_c = \left(\frac{K}{p} + 1\right) \frac{r_c}{2},$$

а сопротивления групп из  $p$  ветвей в каждой

$$\left(\frac{K}{p} - 1\right) \frac{r_c}{2p} \text{ и } \left(\frac{K}{p} + 1\right) \frac{r_c}{2p};$$

так как те и другие соединены параллельно, то измеренное сопротивление будет:

$$r_n = \frac{r_c}{\frac{2p}{\frac{K}{p} - 1} + \frac{2p}{\frac{K}{p} + 1}} = \frac{(K^2 - p^2) r_c}{4Kp^2}.$$

С другой стороны, расчетное сопротивление, согласно определению, равно:

$$r = \frac{Kr_c}{4p^2},$$

откуда следует, что

$$r = \frac{\left(\frac{K}{p}\right)^2 r_n}{\left(\frac{K}{p}\right)^2 - 1} = \frac{K^2}{K^2 - p^2} r_n.$$

Отношение  $\frac{K}{p}$ , т. е. число пластин на пару полюсов, колеблется в нешироких пределах и достигает, во всяком случае, нескольких десятков; следовательно, дробь

$$\frac{K^2}{K^2 - p^2} > 1$$

отличается от единицы настолько мало, что не вносит существенного искажения.

4. Пусть теперь обмотка обладает нечетным неполным числом уравнивающих соединений первого рода, составляющим  $\frac{1}{g}$  часть от всех возможных. Это значит, что между каждыми двумя пластинами, снабженными уравнивающими соединениями, находится  $g - 1$  пластин без уравнивающих соединений.

И в этом случае следует производить измерение сопротивления между пластинами, снабженными уравнивающими соединениями, с номерами, которые отличаются друг от друга на величину, как можно более близкую к одному из чисел ряда (\*). Отклонения от этих чисел могут всегда быть взяты не больше

чем  $\frac{g}{2}$ , да еще к тому же при нечетном  $g$  — с округлением до ближайшего меньшего целого числа.

Подобно предыдущему случаю и здесь обмотка распадается по отношению к измерительному току на две группы по  $p$  па-

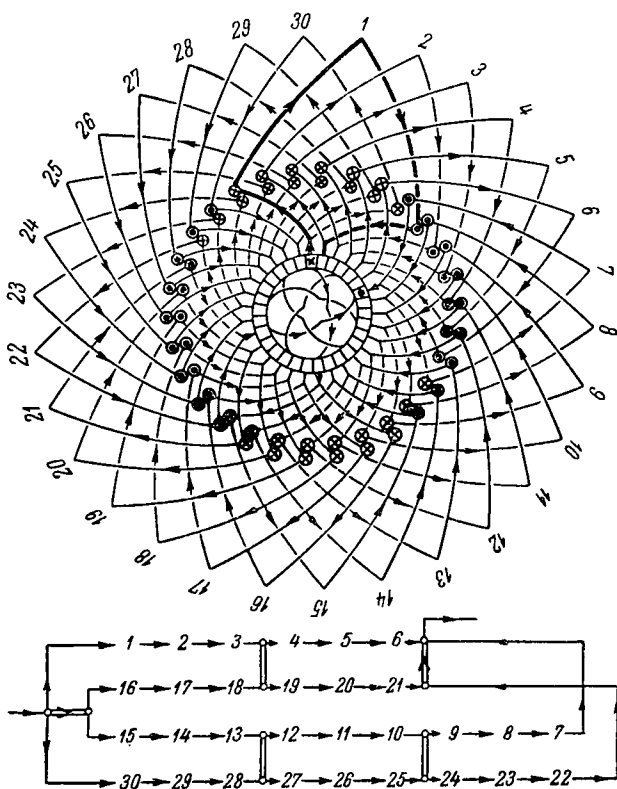


Рис. 2-14. Петлевая обмотка с нечетным неполным числом уравнительных соединений первого рода.

раллельных ветвей, причем число секций в каждой ветви одной группы на  $g$  единиц больше, чем другой, как это можно видеть на примере рис. 2-14, где  $g$  принято равным 3.

Можно представить, что пластины, не имеющие уравни-тельных соединений, вообще удалены; от этого общее число пластин станет в  $g$  раз меньше:

$$K' = \frac{K}{g}.$$

Рассуждая по-предыдущему, найдем для расчетного сопротивления:

$$r = \frac{K'^2 r_{\text{и}}}{K'^2 - p^2} = \frac{K^2}{K^2 - g^2 p^2} r_{\text{и}}.$$

Если обозначить через  $q$  число уравни-тельных соединений, то

$$K = pgq;$$

тогда это равенство примет такой вид:

$$r = \frac{q^2}{q^2 - 1} r_{\text{и}}.$$

При измерении сопротивлений по способу вольтметра и амперметра погрешность измерения определяется как сумма погрешностей обоих приборов; в табл. 2-4 даны наименьшие числа уравни-тельных соединений, при которых отклонение результата измерения не превосходит половины величины общей погрешности измерения в зависимости от класса применяемых для него приборов.

Таблица 2-4

|                                                      |     |     |     |     |
|------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Класс приборов (погрешность в %) . . . . .           | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| Наименьшее число уравни-тельных соединений . . . . . | 32  | 23  | 19  | 15  |

5. Было бы чрезвычайно затруднительно разобрать все возможные конструкции сложных обмоток; можно лишь дать общие указания, как поступать в основных случаях. Из числа сложных обмоток практически находят применение главным образом двукратно-замкнутая волновая обмотка и однократно-замкнутая двухходовая петлевая обмотка; значительно реже встречается однократно-замкнутая двухходовая волновая обмотка, и совсем редко — двукратно-замкнутая петлевая обмотка. Многократно-замкнутые или многоходовые обмотки встречаются лишь в порядке исключения.

Двукратно-замкнутые и двухходовые однократно-замкнутые волновые обмотки снабжаются уравни-тельными соединениями второго рода, соединяющими равнопотенциальные точки раз-

личных обходов. Количество этих соединений обычно составляет небольшую долю всех возможных, редко превосходя 2—2,5 на полюс; они распределяются более или менее равномерно по окружности якоря.

Как и в предыдущих случаях, можно рекомендовать производить измерение сопротивления между пластинами, снабженными уравнительными соединениями и находящимися друг от друга на расстояниях, по возможности близких к числам ряда (\*).

Но тогда сложные волновые обмотки приводятся к предыдущим случаям: вся обмотка в целом распадается на две пары параллельных ветвей, причем числа секций в ветвях этих пар при четном числе уравнительных соединений одинаковы, а при нечетном числе уравнительных соединений, равномерно распределенных по окружности, отличаются друг от друга на число секций, равное частному от деления половины общего числа пластин, т. е. наибольшего возможного числа уравнительных соединений, на выполненное их число:

$$\frac{K}{2q} = g,$$

и расчетное сопротивление получается по знакомой уже формуле

$$r = \frac{q^2}{q^2 - 1} r_{\text{я}}.$$

При не вполне равномерном распределении уравнительных соединений по окружности случай представляется более сложным, и предусмотреть все возможные его разновидности было бы затруднительно.

Для примера на рис. 2-15 представлена двукратно-замкнутая четырехполюсная волновая обмотка, а на рис. 2-16 — двухходовая однократно-замкнутая четырехполюсная волновая обмотка, обе с уравнительными соединениями второго рода; на схемах показано распределение токов при измерении сопротивления.

Отыскание точек присоединения уравнительных соединений в сложных волновых обмотках с четными числами пар полюсов не представляет затруднений, поскольку концы каждого из них присоединены к диаметрально противоположным пластинам коллектора; оно производится поочередным измерением сопротивления по диаметру коллектора до тех пор, пока результат его не окажется близким к нулю.

При нечетном числе пар полюсов отыскивать точки присоединения уравнительных соединений несколько труднее, так как каждое из них соединяет точки обмотки, лежащие по разные стороны якоря (см. ниже п. 11).

6. Сложные петлевые обмотки снабжаются уравнительными соединениями как первого, так и второго рода, причем в однократно-замкнутых двухходовых петлевых обмотках и в двукратно-замкнутых петлевых обмотках, имеющих нечетные числа

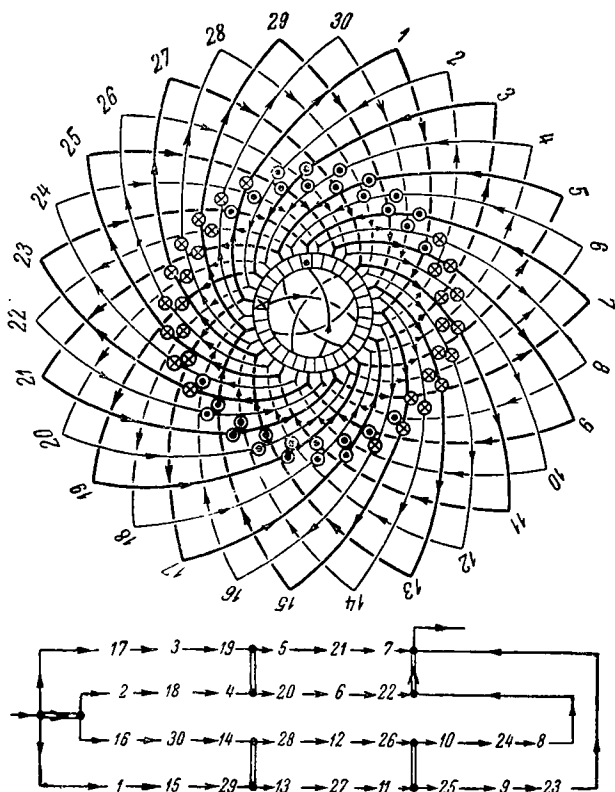


Рис. 2-15. Двукратно-замкнутая волновая обмотка с уравнительными соединениями второго рода.

пластин на пару полюсов, одни и те же соединения одновременно выполняют роль соединений и первого, и второго рода, попеременно охватывая секции обоих обходов. Кроме того, в отдельных случаях применяются также уравнительные соединения третьего рода, соединяющие пластину одного обхода с головкой секции другого обхода, присоединенной к пластинам, со-



седним с данной. Количество уравнильных соединений первого рода сравнительно часто делается полным; если же оно и неполное, то составляет обычно значительную часть возможного количества — половину или третью часть.

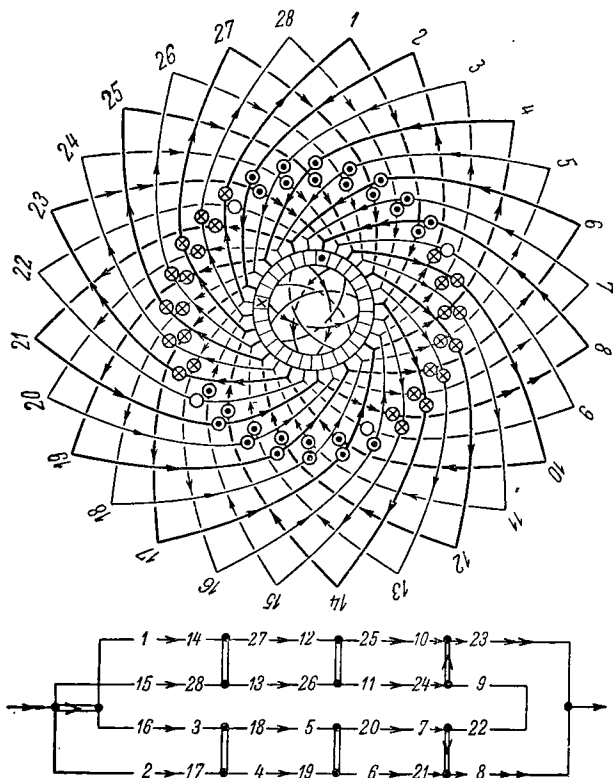


Рис. 2-16. Двухходовая однократно-замкнутая волновая обмотка с уравнильными соединениями второго рода.

В этих условиях измерение сопротивления между пластинами, снабженными уравнильными соединениями и отстоящими друг от друга примерно на числа пластин ряда (\*), всегда будет давать значение, теоретически весьма близкое к расчетному; практически же можно рекомендовать, чтобы пластины, между которыми производится измерение сопротивления, принадлежали к разным обходам, так как при этом распределение

измерительного тока между параллельными ветвями получается более равномерным.

7. Следует рассмотреть величину ошибки в измерении сопротивления, происходящую от невыполнения указания об измерении между пластинами, которые снабжены уравнительными соединениями.

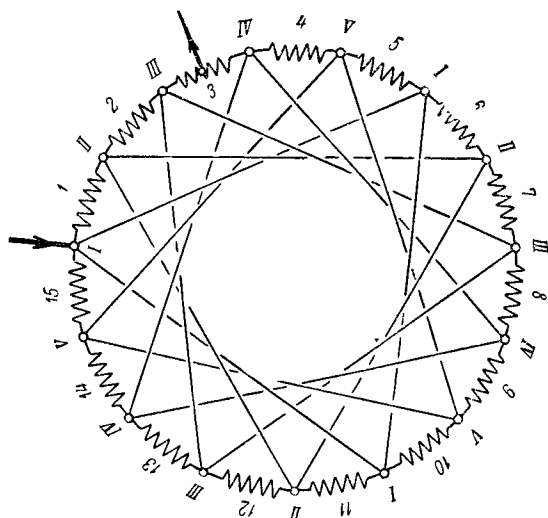


Рис. 2-17. Принципиальная схема петлевой обмотки с нечетным числом уравнительных соединений.

В рассмотрение должен быть принят только случай нечетного числа уравнительных соединений, так как при четном их числе и равномерном распределении по коллектору на расстоянии любого нечетного числа полюсных делений обязательно будут лежать пластины, снабженные уравнительными соединениями.

Пусть, например, имеется шестиполюсная простая петлевая обмотка с числом уравнительных соединений  $q = 5$  (рис. 2-17). Каждое уравнительное соединение первого рода связывает  $p$  пластин, в данном случае три. Тогда точки подключения уравнительных соединений разбивают всю обмотку на  $pq$  равных частей, каждая из которых содержит  $\frac{K}{pq}$  секций. На рис. 2-17 эти части перенумерованы арабскими цифрами, а уравнительные соединения — римскими.

Измерение сопротивления в данном случае может производиться между точкой подключения любого из уравнительных

соединений, например  $I$ , и точкой, удаленной от нее на нечетное число полюсных делений; в данном случае такие точки лежат в серединах участков 3, 8 или 13.

По отношению к измерительному току обмотка представляет сложно разветвленную цепь, в которой нелегко разобраться; но если предположить сопротивление уравнительных соединений настолько малым, что им можно пренебречь, то схема обмотки может быть перечерчена так, как показано на рис. 2-18, и подсчет ее сопротивления не представляет труда.

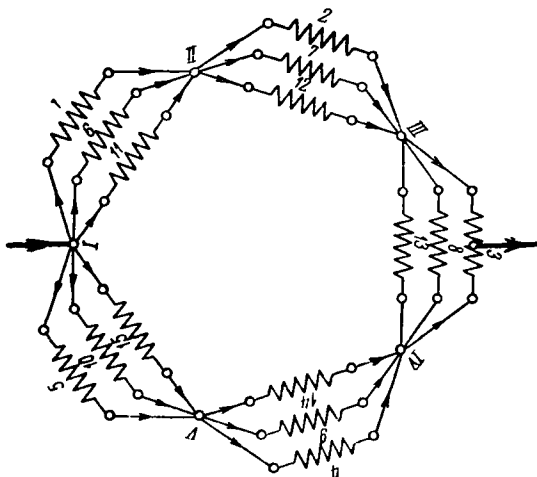


Рис. 2-18. Принципиальная схема обмотки при пренебрежении сопротивлением уравнительных соединений.

От точки подключения измерительной цепи к уравнительному соединению  $I$  обмотка расходится двумя цепями; каждая из них состоит из  $\frac{q-1}{2}$  (в данном случае из двух) участков, содержащих по  $p$  (здесь по три) частей обмотки, соединенных параллельно уравнительными соединениями.

Если сопротивление одной секции обозначить через  $r_c$ , то сопротивление одной части обмотки будет:

$$r_u = \frac{K r_c}{p q},$$

сопротивление одного участка:

$$r_y = \frac{r_u}{p} = \frac{K r_c}{p^2 q},$$

а сопротивление всех участков одной цепи:

$$r_{\text{ц}} = \frac{q-1}{2} r_y = \frac{K(q-1)}{2p^2q} r_c.$$

Последовательно со всей такой цепью включена еще половина секций одной части обмотки; отсюда полное измеряемое сопротивление всей обмотки

$$r_{\text{н}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{K(q-1)}{2p^2q} r_c + \frac{K r_c}{2pq} \right] = r \frac{q+p-1}{q},$$

где

$$r = \frac{K r_c}{4p^2}$$

расчетная величина сопротивления обмотки.

Параллельно с последней частью обмотки, разбитой пополам второй точкой подключения измерительной цепи, присоединены еще  $p-1$  частей; но если данная точка делит свою часть на две равные половины, то эти  $p-1$  частей не несут на себе измерительного тока, потому что их концы находятся под одинаковым потенциалом. Таким образом, они совершенно выпадают из измерения.

Для приведенного примера

$$\frac{q+p-1}{q} = \frac{5+3-1}{5} = \frac{7}{5},$$

т. е. измеренное сопротивление на 40% больше расчетного; конечно, взятое в примере число уравнительных соединений не-

Таблица 2-5

| $\begin{matrix} q \\ p \end{matrix}$ | 7    | 9    | 11   | 13   | 15   | 17   | 19   | 21   | 23   | 25   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2                                    | 14,3 | 11,1 | 9,1  | 7,7  | 6,7  | 5,9  | 5,3  | 4,8  | 4,4  | 4,0  |
| 3                                    | 28,6 | 22,2 | 18,2 | 15,4 | 13,3 | 11,8 | 10,5 | 9,5  | 8,7  | 8,0  |
| 4                                    | —    | 33,3 | 27,3 | 23,1 | 20,0 | 17,6 | 15,8 | 14,3 | 13,0 | 12,0 |
| 5                                    | —    | —    | 36,4 | 30,8 | 26,7 | 23,5 | 21,0 | 19,0 | 17,4 | 16,0 |
| 6                                    | —    | —    | 45,4 | 38,5 | 33,3 | 29,4 | 26,3 | 23,6 | 21,7 | 20,0 |
| 8                                    | —    | —    | —    | 53,8 | 46,7 | 41,2 | 36,8 | 33,3 | 30,4 | 28,0 |
| 10                                   | —    | —    | —    | 69,2 | 60,0 | 52,9 | 47,3 | 42,8 | 39,1 | 36,0 |
| 12                                   | —    | —    | —    | —    | 73,3 | 64,7 | 57,9 | 52,4 | 47,8 | 44,0 |

обычно мало, но и при значительном его увеличении ошибка измерения получается очень заметной. Величина этой ошибки в процентах дана в табл. 2-5 для различных чисел пар полюсов и уравнительных соединений.

Задача становится значительно более сложной в том случае, когда вторая точка присоединения измерительной цепи не делит ровно пополам соответствующую часть обмотки, что должно иметь место при нечетном числе секций в ней, т. е. когда число уравнивателей составляет нечетную долю всех возможных; однако решение ее не является необходимым по той причине, что измерение сопротивления обмотки между точками присоединения уравнительных соединений обеспечивает значительно меньшую ошибку, притом легко учитываемую.

8. Сделанный вывод легко может быть распространен и на сложные обмотки, содержащие уравнительные соединения второго рода. Сложно-петлевая обмотка будет отличаться тем, что при наличии уравнительных соединений и первого, и второго рода каждое уравнительное соединение связывает не  $p$  пластин, а  $a$  пластин коллектора; обмотка разбивается точками присоединения уравнительных соединений на  $aq$  частей, каждая из которых содержит  $\frac{K}{aq}$  секций, а в каждом участке содержится  $a$  соединенных параллельно частей. По этой причине в последнем выводе следует всюду заменить  $p$  на  $a$ ; но так как практически приходится иметь дело только с  $a = 2p$ , то для сложно-петлевых обмоток

$$r_n = r \frac{q + 2p - 1}{q}.$$

Повторяя все рассуждения, нетрудно получить вывод, что для сложно-волновых обмоток, имеющих практически всегда  $a = 2$ ,

$$r_n = r \frac{q + a - 1}{q} = r \frac{q + 1}{q},$$

т. е. для них величина ошибки измерения не зависит от числа полюсов и должна быть взята из первой строки табл. 2-5.

9. Специальный интерес представляет случай, когда уравнительные соединения первого рода одновременно выполняют роль соединений второго рода, что встречается в однократно-замкнутых двухходовых петлевых обмотках с нечетными числами пар полюсов, причем каждое такое уравнительное соединение связывает не  $2p$ , а только  $p$  точек на коллекторе.

На рис. 2-19 представлена условная схема шестиполюсной двухходовой однократно-замкнутой обмотки, на которую нанесено одно из пяти уравнительных соединений; прочие четыре уравнительных соединения только намечены номерами точек их присоединения (римские цифры), чтобы не затемнять чертежа. Как видно из этой схемы, любая пара соединяемых точек принадлежит различным обходам, причем по каждому обходу точки подключения распределены равномерно.

Рассматривая эту схему, нетрудно заключить, что в ней нельзя найти такие точки, измеряя сопротивление между которыми можно было бы получить значение, сколько-нибудь близкое к расчетному.

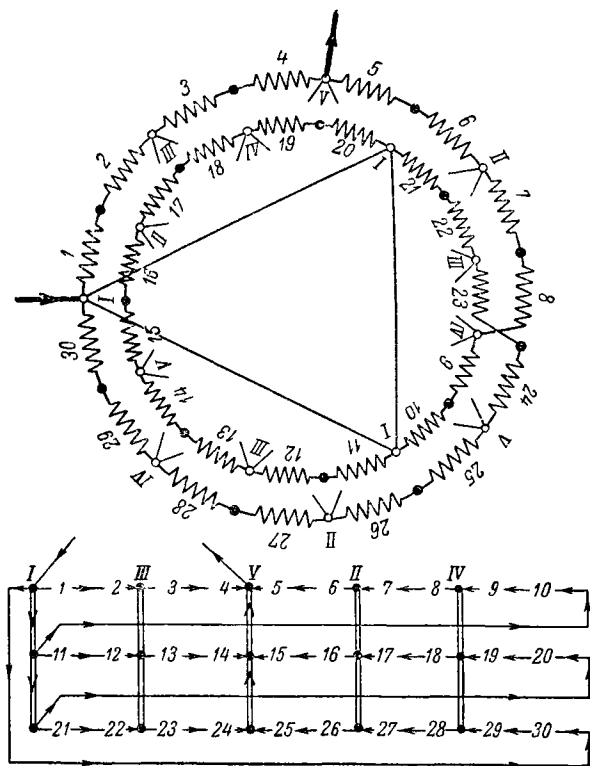


Рис. 2-19. Принципиальная схема однократно-замкнутой двух-ходовой петлевой обмотки с равномерным распределением уравнивающих соединений.

Действительно, если в схеме этого типа производить измерение между точками подключения двух уравнивающих соединений, то цепь измерительного тока будет состоять из двух групп по  $p$  параллельных ветвей, содержащих неравные количества частей обмотки (перенумерованных арабскими цифрами), между тем как по отношению к рабочему току обмотка должна иметь  $4p$  практически одинаковых параллельных ветвей.

Единственный выход может здесь состоять лишь в том, что измерение будет производиться между двумя уравнительными соединениями, электрически как можно более удаленными друг от друга (в данном случае, например, между  $I$  и  $V$ , см. рис. 2-19). Тогда обмотка распадется на две группы по  $p$  ветвей в каждой, причем количество уравнительных соединений в одной группе будет на единицу больше, чем в другой.

Раньше уже было показано, что при измерении сопротивления между двумя такими уравнительными соединениями в простой петлевой обмотке величина расчетного сопротивления  $r$  получается из измеренной величины  $r_n$  введением поправочного множителя, зависящего от числа уравнительных соединений  $q$ :

$$r = \frac{q^2}{q^2 - 1} r_n.$$

Поскольку обстановка измерения здесь вполне сходная, но число параллельных ветвей при измерении вдвое меньше, чем во время работы, можно для данного случая написать:

$$r = \frac{q^2}{4(q^2 - 1)} r_n.$$

10. На рис. 2-20 дан другой тип схемы обмотки, в которой точки подключения уравнительных соединений распределены неравномерно — заполняя два полюсных деления (здесь  $1/3$  окружности) на одном обходе, они затем переходят на другой обход, где также заполняют два полюсных деления, и т. д. Между двумя крайними уравнительными соединениями (в данном случае между  $I$  и  $V$ ) с одной стороны находится группа из  $p$  ветвей, связанных уравнительными соединениями, а с другой стороны — группа из стольких же ветвей, лишенных уравнительных соединений.

Для измерения ничто не изменилось бы, если бы эти ветви тоже были связаны уравнительными соединениями (пунктирные соединения на рис. 2-20 внизу); но тогда общее число соединений стало бы  $2q$ , а сопротивления двух групп, включенных между крайними уравнительными соединениями, относились бы между собой как  $(q - 1) : (q + 1)$ . Производя вычисление сопротивлений, нетрудно установить, что и в этом случае

$$r = \frac{q^2}{4(q^2 - 1)} r_n.$$

Напомним еще раз, что все выводы сделаны в предположении ничтожности сопротивления уравнительных соединений по сравнению с измеряемым.

11. Во всем изложенном до сих пор предполагалось, что уравнительные соединения находятся со стороны коллектора.

Однако практически они чаще осуществляются со стороны, противоположной коллектору, в особенности когда число их неполное.

В этих условиях нельзя говорить о пластинах, снабженных уравнительными соединениями: от каждой точки подключения уравнительных соединений до каждой из двух ближайших пла-

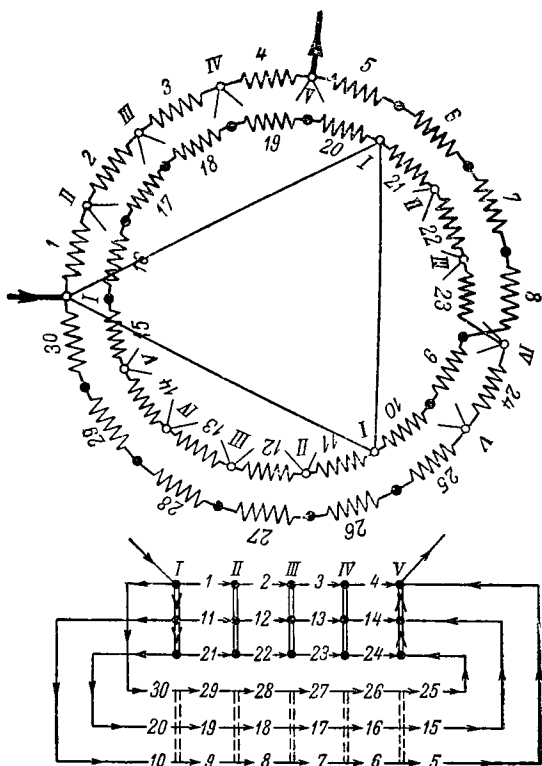


Рис. 2-20. Принципиальная схема однократно-замкнутой двухходовой петлевой обмотки с неравномерным распределением уравнительных соединений.

стин коллектора введено по половине секции обмотки (рис. 2-21). Однако из всех  $2a$  параллельных ветвей каждая такая пластина непосредственно соединяется с двумя ветвями, а остальные  $2a - 2$  параллельных ветвей связаны с данной пластиной через половину секции. Таким образом, искажающее влияние рас-



смаатриваемого обстоятельства на величину измеряемого сопротивления невелико; порядок его одинаков с влиянием сопротивления уравнильных соединений.

Из всего изложенного вытекает, что перед измерением сопротивления обмотки якоря для первых двух целей из числа указанных в начале этого параграфа необходимо точно ознакомиться с устройством обмотки, так как от него зависит как способ измерения, так и вычисление его результата.

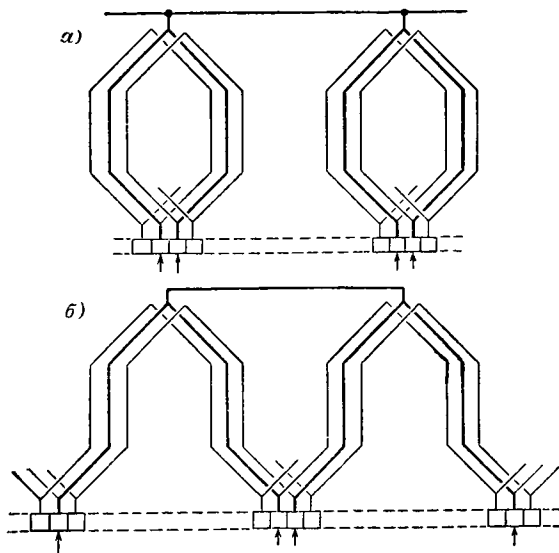


Рис. 2-21. Уравнильные соединения со стороны, противоположной коллектору: *а* — в петлевой обмотке; *б* — в волновой обмотке.

12. В совершенно иных условиях протекает измерение сопротивления обмотки якоря, производимое с целью определения повышения ее температуры во время испытания на нагревание.

Если при остановке машины после такого испытания имеется возможность быстро поднять с коллектора все щетки, не затягивая этим промежутка времени между моментом отключения и моментом первого отсчета для измерения сопротивления, то оно может производиться согласно изложенному, в соответствии с типом обмотки.

Но такая возможность обычно представляется только при испытании небольших машин, в которых количество щеток не-

велико. В более крупных машинах с большим количеством щеток подъем их представляет значительные затруднения, и потому приходится отказаться от применения этих методов.

Но при измерении температуры обмотки по методу сопротивления вовсе не обязательно производить измерение между теми пластинами, которые выбираются с целью получения расчетной величины сопротивления. Вполне достаточно произвести измерение так, чтобы оно давало возможность правильно установить соотношение между сопротивлениями какой-нибудь части обмотки в нагретом и холодном состояниях.

Основным соображением при этом является необходимость уменьшения искажающего влияния наложенных на коллектор щеток, которые могут находиться не точно на одних и тех же пластинах при измерении сопротивления в холодном и нагретом состояниях обмотки.

Средством в этом направлении является уменьшение части обмотки, на которой производится измерение, в пределе — измерение сопротивления одной только секции; чем меньше сопротивление той части обмотки, на которой производится измерение, тем меньшее влияние на результат измерения должно оказывать сопротивление всей остальной части обмотки, включенной параллельно с нею по отношению к измерительному току, и тем ничтожнее должны ощущаться те искажения, которые вносят щетки и различие их положения на коллекторе во время отдельных измерений.

Однако это находится в противоречии с общей установкой при измерении сопротивлений — стремиться всегда измерять как можно более высокие сопротивления, поскольку они легче поддаются измерению.

Чтобы иметь возможность измерить сопротивление одной секции, располагая, как это обычно бывает, наименьшим пределом шкалы вольтметра в несколько десятков милливольт, необходимо было бы доводить измерительный ток до десятков и даже сотен ампер. Понятно, что такие токи нечего и пытаться подводить посредством игольчатых щупов.

При выборе пластин, между которыми производится измерение сопротивления, нужно придерживаться следующих правил:

1) в простых петлевых обмотках с полным числом уравнительных соединений могут быть взяты пластины, лежащие на некотором расстоянии друг от друга в пределах промежутка между соседними комплектами щеток, но не доходя до них на несколько пластин;

2) в простых петлевых обмотках с неполным числом уравнительных соединений в промежутке между теми пластинами, на которых производится измерение, по возможности не должно

находиться пластин, снабженных уравнительными соединениями;

3) в простых петлевых обмотках без уравнительных соединений можно выбирать пластины так же, как и при полном числе уравнительных соединений;

4) в простых волновых обмотках можно производить измерение между пластинами, расположенными на расстоянии любого нечетного числа полюсных делений, лишь бы только эти пластины не лежали под щетками;

5) в сложных петлевых и волновых обмотках следует производить измерение между пластинами, относящимися к одному и тому же обходу, в остальном придерживаясь вышеизложенных правил. Если эти обмотки снабжены уравнительными соединениями второго рода, то в промежутке между пластинами, на которых производится измерение, не должно быть пластин, снабженных соединениями.

Измерение сопротивления и в холодном, и в нагретом состоянии должно производиться между одними и теми же заранее отмеченными пластинами; при остановке после испытания на нагревание якорь затормаживается так, чтобы положение щеток на коллекторе было примерно тем же, как и при измерении в холодном состоянии.

## 2-8. Особенности испытания при повышенной скорости вращения

Машины постоянного тока в большей степени, чем какие-либо другие, нуждаются в тщательной проверке механической прочности вращающейся части — якоря — по причине сложности его устройства и наличия в нем таких трудно поддающихся контролю элементов, как паяные проволочные бандажи на лобовых (а иногда и на пазовых) частях обмотки.

С другой стороны, машины постоянного тока при работе в режиме двигателя могут получать значительные повышения скорости вращения, в частности при параллельном или независимом возбуждении — в случае чрезмерного ослабления возбуждения, а при последовательном возбуждении — в случае чрезмерной разгрузки.

Поэтому ГОСТ 183-55, п. 16, предусматривает для двигателей постоянного тока с регулировкой скорости вращения испытание при повышении скорости вращения на 20% сверх наибольшей, указанной на заводском щитке двигателя, а для двигателей с последовательным возбуждением еще оговаривает, что повышение скорости вращения должно быть не меньше чем на 50% сверх номинальной.

Далее там же указывается, что электрические машины, предназначенные для оборудования гидроэлектростанций, следова-

тельно в том числе и машины постоянного тока, например возбудители с отдельным приводом, генераторы для зарядки аккумуляторных батарей и т. д., должны выдерживать повышение скорости вращения на 50% сверх номинальной.

Особенно жесткие требования предъявляются к двигателям постоянного тока: крановым, подъемно-транспортным и металлургическим; хотя согласно ГОСТ 184-53, п. 21, эти двигатели должны выдерживать повышение скорости вращения сверх максимальной только на 10%, но сама максимальная скорость вращения согласно тому же ГОСТ 184-53, п. 3, превышает номинальную до 3,5 раза, так как при спуске груза могут иметь место весьма значительные повышения скорости вращения.

Аналогичное требование к тяговым машинам предъявляет ГОСТ 2582-50, п. 23, согласно которому эти машины должны выдерживать повышение скорости вращения на 20% сверх максимальной гарантированной; но величина последней этим стандартом не устанавливается, а, согласно п. 13, должна быть установлена в технических условиях на эти машины.

Следует отметить, что при испытании, проводимом в режиме двигателя, для машин с параллельным или независимым возбуждением повышение скорости вращения предпочтительнее производить ослаблением возбуждения, чем повышением приложенного напряжения сверх номинального; в особенности это касается крупных машин высокого напряжения с тяжелыми условиями коммутации.

Для машин с последовательным возбуждением можно рекомендовать проведение испытания при независимом питании обмотки возбуждения; однако если такая машина, испытываемая в режиме двигателя, может быть нагружена на 15—20% номинальной мощности, то испытание может производиться при рабочем соединении обмоток за счет повышения приложенного напряжения, но не более чем на 10—15% сверх номинального.

Испытание при повышенной скорости вращения целесообразно проводить в нагретом состоянии машины с тем, чтобы иметь возможность проверки монолитности коллектора. Если коллектор недостаточно тщательно отформован, то его изоляция в нагретом состоянии размягчится и допустит такие перемещения пластин, которые при холодном коллекторе не могут быть выявлены. После этого испытания следует измерить бие-ние коллектора.

## 2-9. Испытание междувитковой изоляции обмотки якоря

Целесообразно проводить испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмотки якоря непосредственно после испытания при повышенной скорости вращения, так как иначе могут остаться невыявленными такие замыкания, которые

возникли при испытании вследствие вызванных им перемещений в обмотке якоря. Мало того, замыкания витков могут быть непостоянными — существовать только при вращении якоря со скоростью, превосходящей определенное значение, ниже которого они исчезают. Отсюда следует, что испытание изоляции витков нецелесообразно проводить при скоростях ниже номинальной (или наибольшей, указанной на заводском щитке машины, как это имеет место для двигателей с последовательным возбуждением). Поэтому способы испытания междувитковой изоляции при неподвижном якоре могут быть применены только для предварительного, пооперационного контроля.

Для испытания междувитковой изоляции машина приводится во вращение с номинальной скоростью либо в режиме генератора, и тогда ей подается такое возбуждение, при котором напряжение на якоре достигает определенного предела, либо в режиме двигателя, и тогда к ней подводится такое же напряжение; оно выдерживается без изменений в течение пяти минут. Согласно ГОСТ 183-55, п. 28, этот предел для большинства машин составляет 130% от номинального напряжения или наибольшего из номинальных напряжений, если их несколько.

Однако для тех машин, у которых среднее напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами получается настолько высоким, что появляется опасность перекрытия промежутков между пластинами и, как следствие его, возникновения кругового огня на коллекторе, наибольшее допустимое напряжение при испытании берется из расчета среднего напряжения между соседними пластинами не выше 24 в.

**Пример.** Требуется определить предельное допустимое напряжение для испытания изоляции витков обмотки якоря шестнадцатиполусного прокатного двигателя, имеющего номинальное напряжение  $U_n = 750$  в, если число пластин на коллекторе  $K = 600$ .

На один полюс приходится

$$\frac{K}{2p} = \frac{600}{16} = 37,5$$

пластин; следовательно, допустимое напряжение

$$U = 24 \cdot 37,5 = 900 \text{ в,}$$

т. е. всего лишь

$$100 \cdot \frac{900}{750} = 120\%$$

от номинального.

Следует отметить, что стандарт распространяет это ограничение только на машины с числом полюсов более четырех, потому что в небольших машинах, как правило, четырехполюсных или даже двухполюсных, среднее напряжение между пластинами

может быть допущено и более высоким без опасности образования кругового огня. Крупные же машины с четырьмя полюсами редки — это турбогенераторы постоянного тока, в частности возбуждители крупных паротурбинных синхронных генераторов, да изредка быстроходные двигатели постоянного тока, причем в тех и в других напряжение между пластинами может доходить до опасных величин лишь в исключительных случаях, которые следует оговаривать специальными техническими условиями.

В крупных машинах с большими напряжениями между соседними пластинами опасность возникновения кругового огня существует и при значениях ниже 24 в, и тем большая, чем крупнее машина и чем выше окружная скорость коллектора. Это обстоятельство нужно всегда иметь в виду при испытании таких машин и быть к нему готовым. Во избежание несчастных случаев с персоналом, необходимо удалять его от машины на достаточное расстояние, чтобы не могли иметь место ожоги пламенем кругового огня. Кроме того, это пламя действует ослепляющим образом и в особенно тяжелых случаях грозит потерей зрения, поэтому настоятельно рекомендуется, чтобы при таких испытаниях из помещения удалялся весь непосредственно не занятый персонал, а остающийся размещался как можно дальше от машины и был проинструктирован избегать смотреть на коллектор; лучше всего располагаться при этом спиной к машине. Применение защитных темных очков понижает опасность ослепления, но лишает персонал подвижности и уверенности движений, что в свою очередь может служить источником несчастных случаев.

Однако самой действительной, проверенной мерой борьбы с опасностью кругового огня, вызывающего обычно более или менее тяжелые повреждения испытываемой машины, является тщательное приведение поверхности коллектора в состояние, описанное в § 2-4, т. е. удаление всяких заусениц, стружек, грязи, острых краев пластин и других возможных причин появления повышенных градиентов потенциала, а также проведение опыта при вполне приработанном щеточном аппарате и коллекторе, и во всяком случае после всех испытаний на нагревание.

Поднятие напряжения следует производить осторожно и постепенно; для наиболее крупных машин высокого напряжения не рекомендуется превышать 100 в в минуту.

Машины с последовательным возбуждением должны испытываться при питании обмотки возбуждения от постороннего источника. Это же относится к машинам с независимым возбуждением, когда номинальное напряжение возбуждения отличается от номинального напряжения якоря. Для машин с параллельным возбуждением допустимо проведение испытания при самовозбуждении; тем не менее следует и в этом случае

по возможности отдавать предпочтение возбуждению от постороннего источника, так как оно обеспечивает более устойчивое жесткое регулирование напряжения. Кроме того, не всякая машина позволяет поднять необходимое напряжение при самовозбуждении; предел самовозбуждения может оказаться ниже напряжения, требуемого для испытания, а повышение его за счет увеличения скорости вращения для машин постоянного тока стандартом не предусматривается.

Для возбuditелей, рассчитанных на форсировку возбуждения, при которой напряжение превосходит номинальное более чем на 30%, испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмотки якоря должно производиться при предельном напряжении форсировки, однако только в течение 1 мин (ГОСТ 183-55, п. 28).

Для однопостовых сварочных генераторов, у которых номинальное напряжение при нагрузке составляет обычно менее половины напряжения при холостом ходе, испытание междувитковой изоляции должно производиться при напряжении, превышающем на 30% напряжение холостого хода, соответствующее тому из рабочих режимов, при котором это напряжение является наибольшим.

## 2-10. Снятие характеристики холостого хода

После испытания изоляции витков удобно проводить снятие характеристики холостого хода, так как переход к нему не требует никаких изменений в схеме испытания.

Под характеристикой холостого хода понимается зависимость напряжения на якоре ненагруженного генератора от тока возбуждения при неизменной скорости вращения.

Как известно, вследствие явления гистерезиса в магнитных материалах, эта зависимость не является однозначной; при каждом данном значении тока возбуждения величина напряжения зависит также и от того, каким путем получено это значение: увеличением тока возбуждения или уменьшением его, причем разница поблизости от номинального значения напряжения может достигать нескольких процентов от среднего значения.

Для устранения этой неоднозначности можно снимать две ветви характеристики холостого хода — при возрастающем токе возбуждения и при убывающем, а затем находить графически так называемую среднюю характеристику, каждая ордината которой построена при среднем значении абсцисс восходящей и нисходящей ветвей (но не наоборот).

Однако в этом обычно нет нужды; вполне достаточно снять одну только ветвь, и именно нисходящую, т. е. при убывающем

токе возбуждения; путем введения несложной поправки из нее можно получить характеристику, практически не отличающуюся от средней.

Действительно, с вполне достаточной точностью можно считать, что обе ветви полной характеристики холостого хода представляют одну и ту же кривую, сдвинутую по отношению к оси ординат на одну и ту же величину в противоположные стороны, как это представлено в преувеличенном виде на рис. 2-22. Если обозначить величину сдвига через  $\Delta i_0$ , то при сделанном предположении ширина петли полной характеристики, отсчитанная по направлению оси абсцисс, во всех местах будет равна

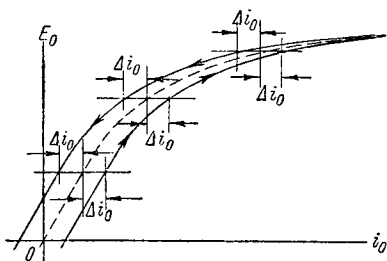


Рис. 2-22. Восходящая и нисходящая ветви характеристики холостого хода.

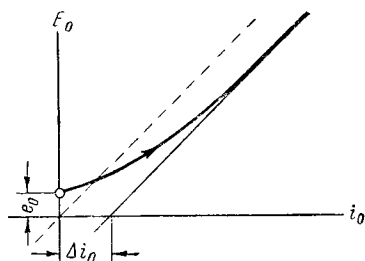


Рис. 2-23. Нижняя часть восходящей ветви характеристики холостого хода.

$2\Delta i_0$ . В современных машинах постоянного тока (кроме самых малых) ширина петли полной характеристики настолько невелика, что отступления от этого предположения вряд ли могут быть обнаружены при помощи практически применяемых измерительных приборов. Тогда средней характеристикой будет являться эта же кривая, проходящая через начало координат (пунктирная кривая на рис. 2-22); следовательно, для ее получения достаточно снять одну лишь ветвь характеристики и ко всем ее абсциссам ввести поправку на величину  $\Delta i_0$  в ту или иную сторону.

Из двух ветвей — восходящей (при возрастающем токе возбуждения) и нисходящей (при убывающем токе) — нужно предпочесть последнюю. Действительно, к моменту начала снятия характеристики холостого хода магнитная система машины уже имеет остаточное намагничивание, в результате которого в якоре индуцируется некоторая э. д. с.  $e_0$  даже при полном отсутствии тока возбуждения. Поэтому при подъеме возбуждения характеристика не может пойти сразу по восходящей ветви; на протяжении некоторого участка (рис. 2-23) она будет проходить



выше, что затрудняет построение и пользование восходящей ветвью.

Между тем нисходящая ветвь на всем своем протяжении не обнаруживает никаких отклонений; будучи начата при некотором наибольшем значении тока возбуждения, она заканчивается при полном отключении последнего и при этом дает возможность измерить электродвижущую силу от остаточного намагничивания  $e_0$ .

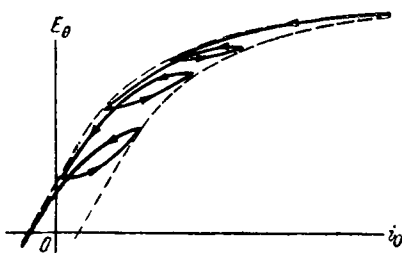


Рис. 2-24. Деформация характеристики холостого хода при неправильном изменении тока возбуждения.

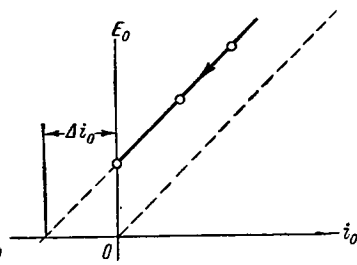


Рис. 2-25. Определение поправки на смещение характеристики холостого хода.

Единственным условием при снятии характеристики холостого хода является то, что ток возбуждения должен изменяться только в одном направлении (т. е. при снятии нисходящей ветви — только убывать); если по какой-нибудь причине это условие будет нарушено, то на характеристике появляются петли, искажающие ее вид. На рис. 2-24 в несколько преувеличенном виде показано, что происходит с характеристикой, если ток возбуждения сначала убывал, затем на некотором промежутке начал возрастать, после чего стал снова убывать, и т. д.

Известно, что нормально нижняя часть характеристики холостого хода прямолинейна, так как при низких токах возбуждения насыщение ферромагнитных участков магнитной цепи настолько ничтожно, что практически все ее сопротивление оказывается сосредоточенным в зазоре между индуктором и якорем. На этом основании, имея несколько измерений в нижней части характеристики, нетрудно определить поправку  $\Delta i_0$  для перевода от нисходящей ветви к средней характеристике, проходящей через начало координат, как это показано на рис. 2-25.

Однако, в некоторых машинах, как, например, в возбудителях синхронных машин, с целью облегчения самовозбуждения при самых низких напряжениях, искусственно добиваются искривления нижней части характеристики холостого хода путем

включения в состав магнитной цепи легко насыщающихся участков, преимущественно в сердечниках главных полюсов (так называемые «регулирующие полюса»). Пример подобной характеристики дан на рис. 2-26. В таких машинах определение поправки  $\Delta i_0$  уже не может быть сделано по рис. 2-26; ее необходимо определить непосредственно опытным путем. Для этой цели, тотчас по окончании снятия нисходящей ветви и отключения тока возбуждения, направление последнего изменяется на обратное и производится измерение его значения, при котором напряжение на якоре обращается в нуль. Это значение тока возбуждения и является искомой поправкой. Для повышения точности его определения амперметр в цепи возбуждения и вольтметр на зажимах якоря должны быть взяты на значительно меньшие пределы измерения, чем те, при которых производилось снятие характеристики.

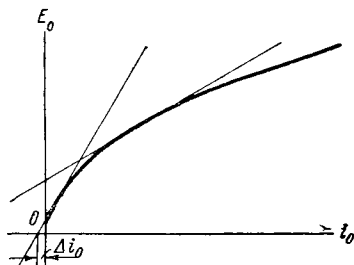


Рис. 2-26. Особый вид нижней части характеристики холостого хода.

Хотя согласно определению характеристика холостого хода относится к номинальной скорости вращения, вовсе не обязательно производить ее снятие непременно при этой скорости; важно лишь точно знать, какая скорость вращения имела место при каждом из произведенных отсчетов. Если обозначить через  $U'_0$  значение напряжения, измеренное при скорости вращения  $n$ , а через  $n_n$  — номинальную скорость вращения, то значение напряжения  $U_0$  для характеристики холостого хода получается пропорциональным пересчетом:

$$U_0 = U'_0 \frac{n_n}{n}.$$

Если машина имеет несколько номинальных скоростей вращения, соответствующих различным режимам работы, характеристика холостого хода должна быть снята при самой низшей из них, так как это дает возможность проверить степень насыщения машины.

Первым отсчетом для характеристики холостого хода может служить отсчет при испытании междувитковой изоляции. Нет нужды гнаться за обилием отсчетов при снятии этой характеристики, как, впрочем, и всякой другой; лучше обратить внимание на надежность каждого из производимых отсчетов. Конечно, чем ответственнее испытание, тем больше имеет смысл повысить количество произведенных отсчетов, но для большин-

ства случаев вполне достаточно 8-10 отсчетов, если их выбрать так, чтобы нанесенные на график точки были расположены друг от друга примерно на одинаковых расстояниях по дуге характеристики, так как это создает наилучшие условия для проведения кривой по лекалу.

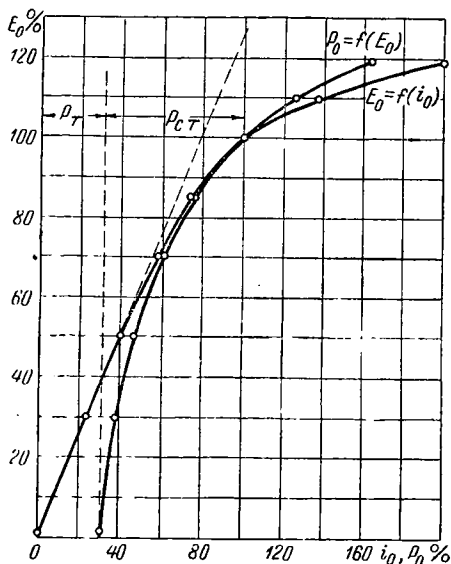


Рис. 2-27. Пример характеристики холостого хода.

Поэтому можно рекомендовать заранее наметить, при каких значениях напряжения будут производиться отсчеты, например по следующей шкале, в которой напряжения выражены в процентах от номинального:

130; 125; 120; 110; 100; 85; 70; 50; 30; 0%.

Под символом «0%» здесь понимается условно отсчет при отключенном токе возбуждения, или при напряжении, обращенном в нуль подачей обратного возбуждения для определения поправки  $\Delta i_0$ . На рис. 2-27 дан пример характеристики холостого хода, снятой согласно этой шкале.

Указанные значения являются ориентировочными; бессмысленно стараться произвести измерения точно при них; небольшие отступления в ту или другую сторону совершенно не нарушают качества характеристики. Наоборот, стремление точно подогнать отсчеты излишне затягивает проведение опыта, утом-

ляет персонал и тем самым ведет к снижению правильности отсчетов.

Для менее ответственных случаев вполне достаточной является сокращенная шкала напряжений:

130; 120; 100; 70; 30; 0%.

Следует, однако, отметить, что в случае машины с искусственно искривленной нижней частью характеристики холостого хода количество отсчетов должно быть увеличено даже по сравнению с полной шкалой, иначе затруднительно провести кривую по лекалу.

Согласно определению характеристика холостого хода должна сниматься при ненагруженном якоре и, следовательно, для всех машин, в том числе и для генераторов с параллельным возбуждением, при независимом возбуждении. Действительно, ток нагрузки якоря создает падение напряжения в обмотке якоря, последовательной обмотке возбуждения и обмотке добавочных полюсов, реакцию якоря, компаундирующее действие добавочных полюсов и последовательной обмотки возбуждения, переходное падение напряжения в контакте щеток на коллекторе и т. д., и все это, даже при небольших величинах тока возбуждения, оказывает искажающее влияние на напряжение, особенно заметное в верхней части характеристики.

Однако в некоторых случаях характеристика холостого хода, снятая при самовозбуждении, представляет самостоятельный интерес; в качестве примера этого можно привести сварочные генераторы, как правило, имеющие значительные токи возбуждения и ярко выраженную реакцию якоря.

Для генераторов с параллельным возбуждением снятие характеристики холостого хода при самовозбуждении имеет тот смысл, что позволяет определить, во-первых, величину критического сопротивления цепи возбуждения, ниже которого самовозбуждение возможно, а выше которого оно не наступает, и, во-вторых, предел напряжения при самовозбуждении или «потолок самовозбуждения», т. е. то напряжение, до которого возбуждается машина при полностью выведенном регуляторе возбуждения. При этом, поскольку обычно речь идет о гарантированном пределе, т. е. таком, который может быть достигнут при любом состоянии машины, сопротивление цепи возбуждения должно быть доведено до значения, которое оно имеет при определенной температуре, например при предельной допустимой для изоляции обмотки возбуждения в соответствии с классом ее материала, или при расчетной рабочей температуре 75°С. Для этой цели сопротивление обмотки возбуждения пересчитывается на нужную температуру и произведения его на различные токи возбуждения откладываются на графике характеристики холостого хода в виде

прямой, проходящей через начало координат (рис. 2-28). Пересечение такой прямой с характеристикой холостого хода дает предел самовозбуждения при данной температуре; чем выше эта последняя, тем круче наклон прямой и тем ниже предел самовозбуждения.

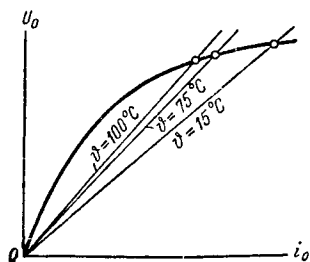


Рис. 2-28. Определение предела самовозбуждения при различной температуре обмотки возбуждения.

Некоторые машины имеют настолько низкий предел самовозбуждения, что он не обеспечивает даже испытание междувитковой изоляции обмотки якоря; но встречается и обратное — предел самовозбуждения значительно превосходит напряжение, необходимое для этого испытания.

Вопрос о пределе самовозбуждения имеет особенно большое значение для возбудителей крупных синхронных машин.

## 2-11. Определение потерь холостого хода

Если приводным двигателем машины постоянного тока, испытываемой в режиме генератора, служит электродвигатель, безразлично постоянного или переменного тока, как это обычно и бывает при испытании на заводе-изготовителе, то одновременно со снятием характеристики холостого хода может быть произведено определение потерь холостого хода. Для этой цели приводной электродвигатель должен быть предварительно протарирован.

Если при снятии характеристики холостого хода одновременно с каждым отсчетом производить отсчеты в цепи приводного двигателя по всем приборам, необходимым для определения подведенной к нему мощности и потерь в нем, то после отделения последних остаток, представляющий мощность, переданную двигателем приводимой машине, даст искомые потери холостого хода этой машины. Эти потери состоят из двух принципиально различных частей:

- 1) потери в стали сердечника якоря на гистерезис и вихревые токи, зависящие как от напряжения, так и от скорости вращения;
- 2) потери механические, зависящие только от скорости вращения: а) потери на трение в подшипниках, б) потери на трение щеток на коллекторе, в) потери на трение якоря о воздух, потери в вентиляторе и т. д.

Таким образом, каждому отсчету характеристики холостого хода будет соответствовать величина суммы потерь холостого хода испытываемой машины, вычисленная по результатам измерений, произведенных на приводном двигателе.

Зависимость суммы потерь холостого хода от напряжения на якоре носит характер, представленный на рис. 2-27. Если все измерения произведены при одной и той же скорости вращения, то механические потери остаются постоянными, а переменными являются только потери в стали. Это дает возможность разделить их проведением линии, параллельной оси абсцисс и проходящей через точку пересечения кривой с осью ординат. Отсюда следует, что для определения потерь холостого хода очень важно поддерживать скорость вращения во время опыта постоянной; а так как зависимость этих потерь от скорости вращения носит сложный характер, то пересчет их от одной скорости к другой затруднителен, и потому необходимо, чтобы скорость вращения имела не какое-нибудь, а именно номинальное значение. Если же машина имеет две или более номинальных скоростей вращения, то опыт должен быть проведен для каждой из них особо.

Зависимость потерь холостого хода от напряжения и характеристика холостого хода могут быть совмещены на общем графике (рис. 2-27). При определении потерь холостого хода машина должна находиться во вполне собранном состоянии: все щиты, заглушки, дверцы, жалюзи и т. п. должны быть на своих местах. Однако, как показывает практика, это нередко упускается из вида, что имеет следствием неправильность результатов опыта.

Кроме того, согласно ГОСТ 183-55, п. 37, при определении потерь холостого хода щетки должны находиться в нейтральном положении, даже если при номинальном режиме работы данной машины они смещаются с нейтрального положения.

Необходимо отметить, что механические потери при холостом ходе имеют несколько большую величину, чем при нагрузке, так как коэффициент трения щеток заметно убывает по мере увеличения тока нагрузки, оказывающего как бы смазывающее действие на контакт щеток на коллекторе.

В результате коэффициент полезного действия, вычисленный согласно методу отдельных потерь (см. ниже § 2-18), имеет заведомо пониженное значение; однако это не находит отражения в стандарте: никакой скидки на уменьшение механических потерь при нагрузке по сравнению с холостым ходом им не предусматривается.

Для того чтобы результаты опыта были достаточно правильными, необходимо производить измерения не сразу после пуска, а лишь тогда, когда температура подшипников достигнет установившегося значения, что требует иногда довольно значительного промежутка времени. Однако поскольку данный опыт входит только в программу типового испытания, требование это следует считать обязательным. Предполагается также, что щетки, коллектор и подшипники скольжения находятся во вполне прира-

ботанном состоянии, поэтому опыты снятия характеристики холостого хода и определения потерь холостого хода целесообразно проводить после испытания на нагревание.

## 2-12. Определение скорости вращения и другие испытания при холостом ходе в режиме двигателя

При холостом ходе в режиме двигателя возможно проведение ряда испытаний — как заменяющих обычно проводимые в режиме генератора, так и особых.

**1. Определение скорости вращения двигателя при холостом ходе.** Это испытание является единственным из всей программы, предписываемой стандартом, которое не может быть проведено в режиме генератора. Оно является обязательным только для машин, предназначенных для работы в режиме двигателя, но может быть проведено лишь при наличии параллельного или независимого возбуждения; при одном последовательном возбуждении двигатель, как известно, не может работать без нагрузки, так как скорость его вращения достигает недопустимых значений.

Непосредственной целью этого испытания является собственно проверка того, какую наименьшую скорость вращения имеет ненагруженный двигатель при подаче номинального напряжения и на цепь якоря, и на обмотку возбуждения. Хотя стандарт этого и не оговаривает, следует довести сопротивление цепи возбуждения до величины, соответствующей 75° С, с тем, чтобы испытания различных машин давали результаты, сравнимые между собой.

Стандарт требует, чтобы это испытание проводилось при рабочем соединении обмоток; как ни мал ток, потребляемый машиной при этом опыте, наличие неправильно включенной последовательной обмотки способно заметно исказить результат.

Естественно, что измерения в этом опыте следует производить не сразу после пуска, а спустя некоторое время, необходимое для установления температуры подшипников, контролируемой по термометрам или термопарам. При контрольных испытаниях можно ориентироваться на время, предписанное в ГОСТ 7217-54 для асинхронных двигателей (см. § 4-6).

**2. Испытание междувитковой изоляции обмотки якоря.** Это испытание может быть произведено путем подведения к машине напряжения, превышающего на 30% номинальное, однако при условии, что скорость вращения при этом не превзойдет номинальную. Во избежание повышения скорости вращения, последовательная обмотка возбуждения, если она имеется и включена встречно параллельной, должна быть отключена. Если параллельная обмотка возбуждения питается от того же источника, что и цепь якоря, то все регулирующие сопротивления

в ее цепи должны быть выведены; если же источник питания самостоятельный, то следует подать наибольший возможный ток возбуждения.

Подъем напряжения, приложенного к машине, нужно производить плавно, чтобы иметь возможность вовремя остановить опыт, если окажется, что скорость вращения превосходит номинальную. Защиту в цепи питания следует ставить на небольшой предел тока с тем, чтобы в случае замыкания витков обмотки якоря или возникновения кругового огня машина автоматически отключилась от источника питания.

**3. Испытание при повышенной скорости вращения.** Это испытание может быть произведено как путем уменьшения тока возбуждения, так и посредством повышения напряжения, приложенного к цепи якоря, однако не более чем на 20% сверх номинального, если величина наибольшего допустимого напряжения между пластинками коллектора не ставит еще более низкого предела.

К этому опыту относятся полностью все меры предосторожности, указанные в отношении предыдущего испытания.

**4. Определение зависимости тока возбуждения от напряжения, приложенного к цепи якоря.** Это испытание при неизменной скорости вращения может заменить снятие характеристики холостого хода, если от испытания не требуется особенно высокой точности.

Опыт удобно проводить непосредственно после испытания междувитковой изоляции, если последнее удастся провести в режиме двигателя при номинальной скорости вращения; тогда отсчет по приборам во время этого испытания может считаться первым отсчетом рассматриваемого опыта. Для получения дальнейших отсчетов следует сначала несколько понижать приложенное напряжение, а затем соответствующим понижением тока возбуждения доводить понизившуюся при этом скорость вращения снова до номинального значения, но не наоборот. Можно пользоваться той же шкалой рекомендуемых значений напряжения, которая была дана при описании опыта снятия характеристики холостого хода. Однако, в отличие от последней, рассматриваемая зависимость не может быть доведена до сколь угодно низких значений приложенного напряжения, так как потребляемый машиной ток холостого хода, в начале опыта убывающий по мере понижения приложенного напряжения, вскоре начинает, наоборот, возрастать; это обстоятельство, с одной стороны, понижает точность опыта, а с другой,—при чрезмерно ослабленном возбуждении создает опасность перемагничивания машины, сопровождаемого резким повышением скорости вращения. Поэтому опыт следует прекратить, когда ток, потребляемый якорем, достигнет 10—15% от номинального.

Чтобы превратить найденную зависимость в характеристику



холостого хода, необходимо из значений приложенного напряжения вычесть падение напряжения в обмотках последовательной цепи и в переходном контакте щеток. Последнее является слабым местом опыта; в то время как падение напряжения в обмотках может быть определено вполне точно, с учетом их действительных сопротивлений во время опыта, падение напряжения в переходном контакте приходится брать, согласно допущению стандарта, как не зависящее от тока якоря. Но если в других случаях несоответствие такого допущения действительному положению вещей не играет заметной роли, то в данном случае плотность тока в переходном контакте щеток настолько велика, что оно становится источником заметной ошибки. Положение может быть отчасти исправлено только посредством опытного получения зависимости падения напряжения в переходном контакте от плотности тока в нем для щеток данной марки, что требует исследования их вне испытываемой машины на специальных приспособлениях.

Неточность полученной описанным путем характеристики холостого хода усиливается невозможностью довести ее до очень малых напряжений, в частности определить влияние остаточного намагничивания, так как нижняя ее часть может быть нанесена только посредством экстраполяции.

**5. Определение потерь холостого хода.** Это испытание может быть произведено одновременно с предыдущим опытом, если при каждом его отсчете измерять подведенную к машине мощность, для чего достаточно к отсчетам тока возбуждения и приложенного напряжения добавить отсчет тока, потребляемого цепью якоря. Чтобы получить потери холостого хода, т. е. сумму потерь в стали и механических потерь, следует из измеренной мощности вычесть потери в обмотках последовательной цепи, вычисленные как произведение квадрата тока в ней на сумму сопротивлений обмоток при температуре опыта, и потери в переходном контакте щеток, как произведение этого же тока на падение напряжения в переходном контакте; как и в предыдущем случае, последнее приходится принимать не зависящим от тока. Но, в отличие от предыдущего, вносимая этим допущением неточность здесь весьма невелика, так как при небольших токах потери эти вообще очень малы.

Как и в случае определения потерь холостого хода в режиме генератора, та часть механических потерь, которая определяется трением щеток, получается преувеличенной. В остальном точность определения потерь холостого хода рассматриваемым способом значительно выше, так как основанием для него служат измерения, производимые непосредственно на испытываемой машине, а не на тарированном двигателе, который вносит в измерение свои неточности; кроме того, и вычислительные операции гораздо проще.

Зато разделение потерь холостого хода встречает затруднение в том, что отсутствуют измерения при очень низких напряжениях.

Поэтому приходится прибегать к разделению потерь методом, именуемым в литературе обычно методом Деттмара.

Сумма потерь в стали и механических потерь откладывается на графике в функции не от первой степени напряжения, а от его квадрата (рис. 2-29). Благодаря этому точки, снятые при наиболее низких напряжениях, оказываются сильно приближенными к оси ординат; так как при небольших насыщениях потери в стали примерно пропорциональны квадрату напряжения, эти точки хорошо укладываются на прямую, экстраполяция которой до пересечения

с осью ординат отсекает на последней механические потери, что может быть сделано обычно с достаточной степенью точности.

**6. Определение зависимости скорости вращения и потерь холостого хода от тока возбуждения.** Это испытание, проводимое при неизменном приложенном напряжении, является видоизменением предыдущих двух опытов, представляющим интерес, когда двигатель предназначается для работы с более или менее широким изменением скорости вращения.

Этот опыт удобно проводить непосредственно вслед за испытанием при повышенной скорости вращения; если оно производилось при номинальном напряжении, то сделанный при нем отсчет может являться первым отсчетом этого опыта. Последним отсчетом будет являться произведенный при полностью выведенном регулирующем сопротивлении в цепи возбуждения. Таким образом, рассматриваемая зависимость имеет довольно узкие естественные пределы.

Попутно могут определяться и потери холостого хода; однако о разделении их без проведения дополнительных опытов не может быть речи. Эти дополнительные опыты должны быть проведены, как описывалось выше, но при нескольких различных скоростях вращения в пределах рассматриваемой зависимости; для каждой скорости вращения разделение потерь производится в отдельности, и затем строится зависимость механических потерь от скорости вращения, которая и используется для отделения их по данным рассматриваемого опыта. Результат

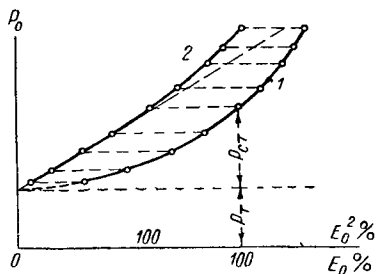


Рис. 2-29. Разделение потерь холостого хода:

1)  $P_0 = f(E_0)$ ; 2)  $P_0 = f(E_0^2)$ .

разделения представляет зависимость потерь в стали от скорости вращения при неизменном приложенном напряжении.

**7. Определение зависимости скорости вращения и потерь холостого хода от приложенного напряжения.** Это испытание, проводимое при неизменном сопротивлении цепи возбуждения (например соответствующем номинальной скорости вращения при номинальном напряжении), представляет интерес в том случае, когда двигатель предназначен для работы от источника с сильно изменяющимся напряжением. Для машин с возбуждением от независимого источника он лишен смысла — их скорость вращения при холостом ходе пропорциональна приложенному напряжению, если только речь идет не о самых малых напряжениях, соизмеримых с падением напряжения в рабочей цепи.

### 2-13. Короткое замыкание в режиме генератора

В машинах постоянного тока короткое замыкание в режиме генератора лишено того принципиального значения, которое оно имеет в синхронных машинах; тем не менее оно очень важно как вспомогательное средство, позволяющее провести ряд испытаний, связанных с нагрузкой током обмоток последовательной цепи в тех случаях, когда нет иных возможностей нагрузить машину, например по причине ее слишком большой мощности.

Если машина, помимо параллельной или независимой обмотки возбуждения главных полюсов, имеет еще последовательную обмотку, то для осуществления режима короткого замыкания нужно включить ее встречно (на размагничивание главных полюсов).

Самовозбуждение замкнутой накоротко машины при согласном включении последовательной обмотки носит чрезвычайно бурный характер; ток короткого замыкания достигает огромных значений, иногда в десятки раз превышающих номинальное, и машина получает тяжелые повреждения — расплавление обмоток, оплавление коллектора и разрушение щеточного аппарата, а иногда и поломку вала. Поэтому, если даже полярность последовательной обмотки считается предварительно проверенной, ни в коем случае нельзя замыкать машину сразу наглухо. Риск повредить машину из-за ошибки при проверке соединений обмоток настолько велик, что правильность последнего обязательно должна быть проверена опытным путем, тем более, что способ такой проверки чрезвычайно прост.

К машине, приготовленной к короткому замыканию, подключается максимальный автоматический выключатель, уставка которого не превосходит  $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$  номинального тока машины (рис. 2-30, а).

Проверка может производиться тремя способами.

1. Выключатель замыкается при неподвижном состоянии ма-

шины, которая после этого приводится во вращение. Если последовательная обмотка включена согласно, машина может самовозбудиться, и выключатель разомкнет цепь короткого замыкания; но если этого не произойдет, то для полной уверенности в том, что последовательная обмотка включена встречно, следует начать постепенно подавать в параллельную обмотку воз-

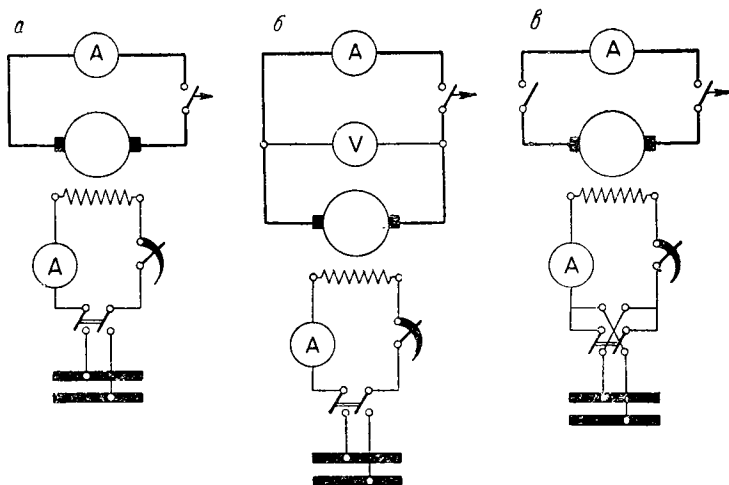


Рис. 2-30. Схемы для опробования короткого замыкания.

буждение от постороннего источника. Только убедившись в том, что ток короткого замыкания подчиняется управлению, можно перейти к осуществлению глухого короткого замыкания.

2. Машина приводится во вращение при разомкнутом выключателе, к зажимам которого присоединяется вольтметр (рис. 2-30, б). Путем подачи соответствующего возбуждения от независимого источника машина полностью размагничивается и показания вольтметра доводятся до нуля, после чего цепь якоря замыкается выключателем. Эта операция имеет своей задачей обезопасить персонал, производящий включение, от моментального отключения выключателя, так как самовозбуждение хорошо размагниченной машины происходит относительно не так быстро, что дает возможность удалиться от выключателя на достаточное расстояние.

3. Последовательно с выключателем вводится рубильник (рис. 2-30, в). Машина приводится во вращение при замкнутом выключателе, но разомкнутом рубильнике, и затем последний замыкается быстрым и решительным движением.

Применение для целей проверки поляризованных автоматических выключателей с независимо питаемыми держащими катушками совершенно недопустимо, так как они способны производить отключение только при определенном направлении тока главной цепи; при противоположном же направлении тока они не только не отключают, но их рабочие контакты прижимаются еще сильнее, так что и размыкание цепи держащей катушки уже не заставляет их отключить.

В случае отсутствия автоматического выключателя может быть применен плавкий предохранитель, рассчитанный на 10—15% номинального тока машины; это, однако же, далеко не так удобно.

Машины, не имеющие последовательной обмотки, не могут быть непосредственно замкнуты накоротко, так как они самовозбуждаются за счет компаундирующего действия добавочных полюсов, нормально создающих ускоренную коммутацию, что как бы смещает нейтральную линию против направления вращения.

Правда, для целей сушки якорею током применяется способ короткого замыкания таких машин при щетках, сдвинутых с нейтрального положения по направлению вращения на угол, достаточный для того, чтобы размагничивающее действие возникающей при этом продольной составляющей реакции якоря оказалось сильнее намагничивающего действия добавочных полюсов; но для целей испытания такой способ короткого замыкания непригоден, так как сдвиг щеток выводит машину из ее нормального рабочего состояния. Поэтому в таких машинах приходится искусственно создавать размагничивающую обмотку на главных полюсах.

Если в машине имеются достаточные промежутки между обмотками главных и добавочных полюсов, то можно наложить временную последовательную обмотку гибким изолированным проводником, просовывая его в эти промежутки.

В машинах с номинальными токами в сотни ампер обычно вполне достаточно бывает наложить по одному витку на каждый главный полюс. При этом необходимо следить за тем, чтобы наложенная обмотка не охватывала добавочных полюсов, т. е. чтобы она не могла создавать дополнительное намагничивание последних. На рис. 2-31, *а* и *б* показано правильное и неправильное наложение такой обмотки.

При более высоких токах — в тысячи ампер — необходимое сечение проводника становится настолько большим, что его приходится подразделять на части, включая параллельно два и более проводников. Но в этом случае оказывается вполне достаточным иметь по  $1/2$  витка на полюс (в пересчете на полный ток последовательной цепи).

На рис. 2-31, *в* представлена схема наложения обмотки из двух параллельных проводников, образующих по  $1/2$  витка на каждый полюс и притом расположенных так, что влияние их на

добавочные полюса исключаются даже в том случае, если распределение тока между проводниками окажется неравномерным, так как при этом все добавочные полюса будут получать дополнительное намагничивание одной и той же полярности.

Если промежутки между обмотками главных и добавочных полюсов недостаточны для прохода проводника временной обмотки, приходится для размагничивания использовать часть обмотки главных полюсов, но для этого ее отдельные катушки нужно пересоединить; именно, все катушки разделяются на две равные группы. Одна из них, состоящая из катушек, расположенных на полюсах, допустим, нечетной нумерации и включенных последовательно друг с другом, служит по-прежнему для возбуждения от независимого источника. Катушки другой группы, расположенные на полюсах

четной нумерации, должны заменить последовательную обмотку. Но так как сечение их проводников недостаточно для того, чтобы ввести их последовательно в цепь якоря даже при параллельном соединении друг с другом, приходится их шунтировать каким-либо сопротивлением, с одной стороны, способным пропустить через себя ток короткого замыкания, а с другой, — достаточным для того, чтобы создать падение напряжения, необходимое для питания группы размагничивающих катушек.

Проще всего для этой цели использовать обмотку добавочных полюсов, как это показано на рис. 2-32, *а*. Ток, ответвляющийся в эту группу, настолько невелик, что не может существенно нарушить коммутационные условия машины из-за ослабления добавочных полюсов; к тому же последнее может быть учтено при наладке коммутации машины.

В машинах с чисто последовательным возбуждением можно поступать аналогичным образом, подразделяя катушки на две группы, одна из которых служит для возбуждения от независимого источника, а другая может быть включена в цепь якоря (рис. 2-32, *б*); и здесь целесообразно соединять катушки этой группы параллельно друг с другом.

Правильность включения размагничивающей обмотки при

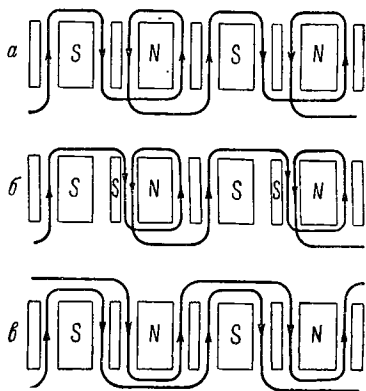


Рис. 2-31. Наложение временных размагничивающих обмоток: *а* и *в* — правильно; *б* — неправильно.

всех приведенных искусственных способах должна быть проведена точно так же, как и при использовании собственной последовательной обмотки.

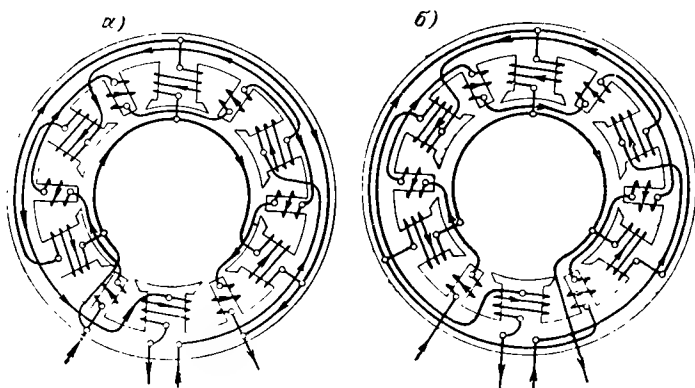


Рис. 2-32. Использование части обмотки главных полюсов в качестве размагничивающей обмотки: *а* — при параллельной обмотке; *б* — при последовательной обмотке.

Однако операция переключения обмоток в крупных машинах является подчас весьма затруднительной; в этих условиях можно прибегнуть к следующему способу.

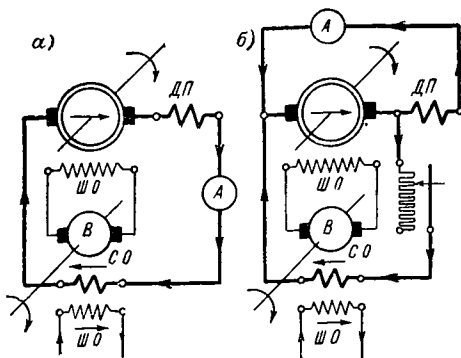


Рис. 2-33. Использование последовательной обмотки возбудителя для устойчивости короткого замыкания.

В цепь короткого замыкания испытываемой машины вводится последовательная обмотка вспомогательного генератора постоянного тока, питающего параллельную обмотку испытываемой машины, включенная на размагничивание (рис. 2-33, а). Желательно, чтобы номинальный ток вспомогательной машины был не меньше номинального тока испытываемой машины; тогда для размагничивания вспомогательной машины может быть использована ее собственная последовательная обмотка.

Поскольку для питания параллельной обмотки испытываемой машины в режиме короткого замыкания требуется очень небольшое напряжение, во многих случаях в качестве вспомогательной машины может быть использован низковольтный многоамперный генератор для питания электролитических ванн.

Если же номинальный ток вспомогательной машины меньше, чем испытываемой, то либо на главные полюса вспомогательной машины может быть наложена временная размагничивающая обмотка по рис. 2-31, либо ее собственная последовательная обмотка подключается к якорию испытываемой машины через регулирующее сопротивление (рис. 2-33, б).

## 2-14. Характеристика короткого замыкания

Снятие характеристики короткого замыкания, под которой понимается зависимость тока короткого замыкания от тока возбуждения при неизменной скорости вращения, в машинах постоянного тока не обязательно и в программу испытания не входит. Тем не менее ее данные могут быть с успехом использованы для предопределения тока возбуждения при нагрузке, изменения напряжения и т. д.

Если бы сопротивление цепи короткого замыкания оставалось постоянным, эта зависимость была бы прямолинейна, т. е. изменение тока короткого замыкания было бы пропорционально соответствующему изменению тока возбуждения. Но в действительности пропорциональность нарушается, в особенности в самой нижней части кривой (см. рис. 2-34), по той причине, что сопротивление цепи короткого замыкания не остается постоянным, но зависит от тока короткого замыкания уже вследствие наличия такой переменной составляющей, как сопротивление переходного контакта щеток. Последнее при малых плотностях тока в контакте имеет значительно более высокую величину, чем при больших, изменяясь почти обратно пропорционально плотности тока, что дает даже основание принимать падение напряжения в переходном контакте за постоянное, практически не зависящее от плотности тока; хотя это не вполне верно, особенно при очень малых плотностях тока, но все же более близко к действительности, чем предположение о постоянстве сопротивления.

Учитывая это обстоятельство, легко прийти к выводу, что при



прочих равных условиях рассматриваемая зависимость тем ближе к прямой, чем меньшую долю общего сопротивления цепи короткого замыкания составляет сопротивление переходного контакта щеток. Отсюда следует, что отклонения от прямо-

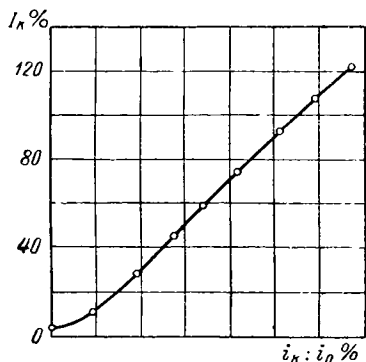


Рис. 2-34. Характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока.

линейности должны быть тем меньше, чем выше номинальное напряжение машины, чем меньше ее номинальная мощность и чем мягче применяемая марка щеток. Опыт полностью подтверждает правильность этих предположений.

Подобно характеристике холостого хода, наличие остаточного намагничивания является причиной того, что при токе возбуждения, равном нулю, ток короткого замыкания отличен от нуля. Но если там влияние этого обстоятельства могло быть учтено введением поправки  $\Delta i_0$ , здесь это не может быть сделано аналогичным пу-

тем именно по причине упомянутого искривления нижней части характеристики. Неоднозначность характеристики короткого замыкания вследствие явления гистерезиса хотя и существует, но в значительно меньшей степени, чем характеристики холостого хода. Гораздо более важным обстоятельством является изменение температуры обмоток в процессе снятия характеристики: всякое повышение температуры, а вместе с ней и сопротивлений обмоток, вызывает понижение тока короткого замыкания, в результате чего восходящая ветвь характеристики короткого замыкания нередко кажется лежащей выше, чем нисходящая.

При снятии восходящей ветви температура обмоток постепенно повышается, а при снятии нисходящей — понижается; известное запаздывание изменения температуры по отношению к изменению токов и служит причиной этого явления. При прочих равных условиях поддержать примерное постоянство температуры обмоток гораздо легче во время снятия нисходящей ветви, нежели восходящей, почему первое и нужно предпочесть.

Ввиду близости зависимости тока короткого замыкания от тока возбуждения к прямой линии, нет никакой надобности в производстве большого количества отсчетов для ее построения; достаточно трех-четырех надежно произведенных измерений. С другой стороны, чем меньше измерений, тем легче обеспечить постоянство температуры обмоток.

Для того чтобы можно было использовать данные короткого замыкания, они должны быть соответствующим образом обработаны.

Ток возбуждения при коротком замыкании может рассматриваться как состоящий из трех частей:

а) часть, необходимая для компенсации размагничивающего действия встречно включенной последовательной обмотки возбуждения;

б) часть, необходимая для создания э. д. с., равной сумме всех падений напряжения в цепи короткого замыкания;

в) часть, необходимая для компенсации реакции якоря.

Характерными для машины являются только последние две части; поэтому от тока возбуждения следует прежде всего отделить первую часть.

Это легко сделать, если известны полные числа витков обмотки параллельного или независимого возбуждения и размагничивающей обмотки, постоянной или временной. Если обозначить первое из них через  $w_{\text{ш}}$ , второе через  $w_{\text{с}}$ , числа параллельных ветвей обмоток через  $a_{\text{ш}}$  и  $a_{\text{с}}$ , измеренный ток возбуждения через  $i_{\text{к}}$ , а соответствующий ему ток короткого замыкания через  $I_{\text{к}}$ , то искомый остаток, представляющий сумму последних двух частей, будет:

$$i'_{\text{к}} = i_{\text{к}} - \frac{w_{\text{с}}}{w_{\text{ш}}} \frac{a_{\text{ш}}}{a_{\text{с}}} I_{\text{к}}.$$

Для отделения второй части от третьей необходимо знать величину суммы сопротивлений всех составных частей цепи короткого замыкания в момент опыта. В отношении неподвижных обмоток (последовательной, добавочных полюсов), а также тех проводников, измерительных шунтов и т. д., посредством которых осуществлено короткое замыкание зажимов машины, достаточно во время опыта производить измерение суммы падений напряжения, присоединив вольтметр к щеточным траверзам.

Несколько сложнее обстоит дело с сопротивлением обмотки якоря  $r_{\text{я}}$ ; оно может быть измерено лишь немедленно после остановки с применяемой в таких случаях экстраполяцией.

Но сопротивление переходного контакта щеток трудно поддается измерению; можно либо принимать падение напряжения под щетками каждой полярности  $\Delta U$  не зависящим от нагрузки и равным определенной условной величине, характерной для группы, к которой относится марка данных щеток (см. ниже § 2-18), либо применить попытку учета этого падения напряжения совместно с прочими, присоединив упомянутый выше вольтметр не непосредственно к щеточным траверзам, а к отдельным измерительным щеткам, полностью изолированным от их щеткодержателей.

Если обозначить через  $r_{\text{с}}$  и  $r_{\text{д}}$  сопротивления последователь-

ной обмотки и обмотки добавочных полюсов и  $r_b$  — сопротивление всех внешних соединений, то э. д. с. в якоре должна быть равна:

$$E_k = I_k(r_c + r_d + r_b) + I_k r_a + 2\Delta U.$$

По характеристике холостого хода для этого значения э. д. с. можно определить соответствующий ей ток возбуждения  $i_0$ . Если отнять его от  $i'_k$ , то остаток будет представлять ту часть тока возбуждения  $i_a$ , которая необходима для компенсации реакции якоря:

$$i_a = i'_k - i_0.$$

Эта последняя и составляет наиболее ценный результат опыта короткого замыкания.

Если все приведенные выше рассуждения правильны, то зависимость  $I_k = f(i_a)$  должна представлять прямую линию, так как насыщение магнитной цепи при коротком замыкании настолько мало, что не должно оказывать на нее заметного искривляющего влияния. Если эта прямая не проходит через начало координат из-за наличия остаточного намагничивания, то не представляет затруднений графически определить поправку  $\Delta i_k$  для приведения ее к началу координат.

При снятии характеристики короткого замыкания можно произвести определение потерь короткого замыкания, действуя так же, как и при снятии характеристики холостого хода. Но ценность этого определения невелика; с одной стороны, основные потери короткого замыкания легко поддаются определению подсчетом; с другой же, добавочные потери короткого замыкания в машинах постоянного тока далеко не так велики, как это имеет место, например, в синхронных машинах. В отличие от опыта холостого хода, механические потери не остаются здесь постоянными даже при неизменной скорости вращения; как было уже указано, коэффициент трения щеток на коллекторе довольно сильно зависит от плотности тока под щетками, падая с увеличением последней, учет же этого обстоятельства очень затруднителен.

Все это вместе взятое затрудняет опытное определение добавочных потерь короткого замыкания, как остатка от вычитания всех учитываемых видов потерь из измеренных, вследствие чего следует признать определение добавочных потерь короткого замыкания таким путем мало целесообразным.

## 2-15. Снятие характеристик при нагрузке в режиме генератора

Хотя снятие характеристик при нагрузке в режиме генератора для машин постоянного тока программой типового испытания ГОСТ 183-55 и не предусматривается, но оно входит в про-

граммы испытаний, установленные стандартами на отдельные виды машин; материал, доставляемый характеристиками, настолько ценен, что имеет смысл затратить при типовом испытании некоторое время на их снятие также и для машин общего применения, если к тому представляется возможность.

Под внешней характеристикой генератора понимается зависимость напряжения на его зажимах от тока нагрузки (реже — от отдаваемой мощности) при неизменной скорости вращения, неизменном токе возбуждения, если оно независимое, или неизменном положении органов регулирования возбуждения, если машина работает на самовозбуждении, и расчетной рабочей температуре обмоток.

Снятие внешней характеристики ведется при понижении нагрузки: номинальное напряжение устанавливается при номинальной нагрузке и генератор постепенно разгружается до холостого хода увеличением сопротивления нагрузки. Отсюда непосредственно определяется важная величина — номинальное изменение напряжения, под которым согласно ГОСТ 183-55 (примечание, п. 24) понимается изменение напряжения на зажимах генератора (при работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинальной до нулевой и при сохранении номинальной скорости вращения и других условий снятия внешней характеристики. Изменение напряжения выражается в процентах или долях номинального напряжения.

Допускаемое отклонение номинального изменения напряжения от предписываемого стандартами или техническими условиями установлено ГОСТ 183-55, п. 30, для генераторов с параллельным или независимым возбуждением в размере  $+20\%$ , а для генераторов со смешанным возбуждением в размере также  $+20\%$ , но не менее  $2\%$  от номинального напряжения.

Вид внешней характеристики зависит от системы возбуждения. При параллельном или независимом возбуждении она является падающей, т. е. напряжение понижается по мере увеличения нагрузки, причем в первом случае сильнее, чем во втором, что и понятно, поскольку в нем ток возбуждения не остается неизменным, а сам понижается вместе с напряжением. Это понижение тока возбуждения приводит к тому, что, начиная с некоторой критической величины, дальнейшее уменьшение нагрузочного сопротивления уже не вызывает более возрастания тока нагрузки, а ведет лишь к еще большему понижению напряжения на зажимах и тока нагрузки; характеристика дает возврат к началу координат (рис. 2-35, кривая *a*), и ток короткого замыкания мал, составляя обычно лишь долю номинального.

Было бы крайне затруднительно дать какие-либо общие количественные соотношения, определяющие внешнюю характеристику; можно лишь сказать, что в общем отношении наибольшего тока нагрузки (при критическом внешнем сопротивлении)

к номинальному тем больше, чем крупнее машина; поэтому только в небольших машинах возможно снять характеристику от холостого хода до короткого замыкания полностью. Нижняя ветвь характеристики является неустойчивым участком; снятие ее представляет значительные затруднения и удается не на каждой машине.

Напротив, при независимом возбуждении всякое уменьшение внешнего сопротивления ведет только к увеличению тока нагрузки, а внешняя характеристика устойчива на всем своем про-

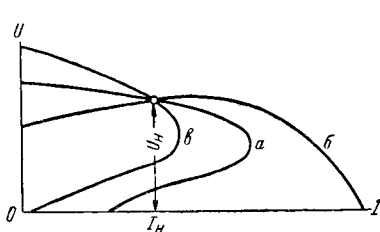


Рис. 2-35. Внешние характеристики генератора с самовозбуждением: *а* — параллельное возбуждение; *б* — смешанное согласное возбуждение; *в* — смешанное встречное возбуждение.

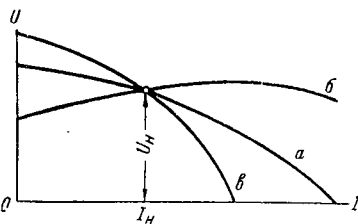


Рис. 2-36. Внешние характеристики генератора с независимым возбуждением: *а* — без последовательной обмотки; *б* — смешанное согласное возбуждение; *в* — смешанное встречное возбуждение.

тяжении (рис. 2-36, кривая *а*). Здесь ток короткого замыкания очень велик, и потому не может быть речи о снятии всей характеристики; величина тока короткого замыкания приблизительно определяется из характеристики короткого замыкания пересчетом, что дает преувеличенный результат, так как при больших токах характеристика короткого замыкания более или менее сильно отклоняется от прямолинейной. Искривление внешней характеристики, имеющей выпуклость, обращенную кверху, характерно для некомпенсированных машин; в компенсированных же машинах форма внешней характеристики более приближается к прямой.

Наличие последовательной обмотки, в зависимости от ее включения, либо повышает внешнюю характеристику (при согласном включении), либо понижает ее (при встречном). На рис. 2-35 и 2-36 представлены внешние характеристики для согласного включения последовательной обмотки (кривые *б*) и для встречного ее включения (кривые *в*).

Из числа специализированных стандартов снятие внешних характеристик предписывает только ГОСТ 2535-44, п. 20, — для генераторов одноколлекторных зарядно-буферных.

В некоторых случаях снятие внешней характеристики заменяется сбросом нагрузки; например, ГОСТ 2308-43, п. 20, предпи-

сывает проведение такого опыта при контрольном испытании транспортных турбогенераторов малой мощности.

Если величина допустимого изменения напряжения при сбросе нагрузки установлена техническими условиями, а при снятии внешней характеристики или при опыте сброса нагрузки получается величина изменения напряжения, превосходящая допустимую, то не исключается возможность некоторого исправления внешней характеристики смещением щеток из нейтрального положения в тех пределах, в которых коммутация машины остается удовлетворительной. Следует, однако, иметь в виду, что величина изменения напряжения зависит от состояния щеточного аппарата; если щетки не вполне приработаны, то нельзя ручаться, что величина изменения напряжения сохранится в дальнейшем. Поэтому снятие характеристик и выполнение опыта сброса нагрузки имеет смысл делать только после полной приработки щеток.

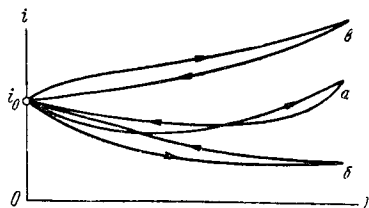


Рис. 2-37. Регулировочные характеристики генератора. Обозначения кривых — как на рис. 2-35.

Под регулировочной характеристикой в режиме генератора понимается зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (или полезной мощности, что в данном случае равнозначно) при неизменной скорости вращения и неизменном напряжении на зажимах машины. Ее также можно снимать как при независимом возбуждении, так и при самовозбуждении, однако принципиальной разницы в этом нет; действительно, если при самовозбуждении откладывать ток возбуждения в функции суммы тока нагрузки и тока возбуждения, то характеристика ничем не будет отличаться от снятой при независимом возбуждении; а ввиду относительной малости тока возбуждения прибавление его к току нагрузки очень мало влияет на форму характеристики.

Снятие регулировочной характеристики может производиться как при повышении нагрузки, так и при понижении ее. Получающиеся при этом результаты не совпадают друг с другом (рис. 2-37); под влиянием гистерезиса ветвь характеристики при возрастающей нагрузке располагается выше ветви при убывающей нагрузке, если с увеличением нагрузки ток возбуждения возрастает, и ниже ее, если он убывает, как это имеет место, например, в генераторах со смешанным возбуждением при сильной последовательной намагничивающей обмотке.

Можно ввести понятие о средней регулировочной характеристике совершенно так же, как и о средней характеристике хо-

лостого хода. Но если для последней, как было выяснено выше, можно обойтись снятием одной лишь нисходящей ветви, из которой путем несложных операций получается средняя характеристика, здесь это сделать невозможно; поэтому приходится производить снятие обеих ветвей регулировочной характеристики и затем графически находить среднюю.

Регулировочная характеристика важна не только тем, что указывает, как нужно обращаться с машиной, чтобы поддерживать напряжение неизменным при всех нагрузках, но также и тем, что представляет основу для определения потерь на возбуждение при построении зависимости коэффициента полезного действия от нагрузки по методу отдельных потерь.

Изменение сопротивлений обмоток последовательной цепи от нагревания не остается без влияния на внешние и регулировочные характеристики; хотя это влияние много меньше, чем в случае характеристики короткого замыкания, снятие этих характеристик должно производиться при хорошо прогретой машине. Сопротивление же параллельной обмотки возбуждения играет роль только при снятии внешней характеристики на самовозбуждении, да и то лишь в тех редких случаях, когда эта характеристика снимается полностью; от него зависит величина тока нагрузки при критическом значении сопротивления внешней цепи — чем выше, при прочих равных условиях, сопротивление параллельной обмотки возбуждения, тем ниже этот ток.

Нагрузочной характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах от тока возбуждения при неизменной скорости вращения и неизменном токе нагрузки.

Такой режим характерен для генераторов, работающих на химические приемники — батареи аккумуляторов, электролитические ванны и т. д., поэтому все стандарты на подобные машины включают снятие нагрузочных характеристик в программу типового испытания; целью его ставится определение пределов регулирования напряжения при различных токах нагрузки (ГОСТ 1651-54, п. 37; ГОСТ 2167-43, пп. 20, 36, 37 и 38; ГОСТ 2595-44, пп. 20 и 24). Кроме того, оно включено в программу типового испытания тяговых генераторов (ГОСТ 2582-50, п. 20).

Как правило, если нет специальных оговорок, снятие нагрузочных характеристик производится сверху вниз — от некоторого наибольшего напряжения при данном токе нагрузки путем постепенного понижения тока возбуждения и сопротивления нагрузки. При этом порядок оперирования, если он не установлен стандартами или техническими условиями, определяется способами регулирования тока возбуждения и сопротивления нагрузки. Первый из них всегда поддается достаточно плавному регулированию, чего нельзя сказать о втором; в частности, если сопротивление нагрузки может изменяться только ступенями,

следует начинать с его уменьшения и затем возбуждением подгонять величину заданного тока нагрузки.

Пределы регулирования напряжения самовозбуждающегося генератора при данном токе нагрузки, естественно, должны зависеть от температуры обмотки возбуждения; между тем ни в одном из упомянутых стандартов температура эта не оговаривается. Поэтому, как и в случае определения предела самовозбуждения при холостом ходе, могут быть рассмотрены пределы самовозбуждения при предельной допустимой температуре соответственно классу примененных изоляционных материалов или при расчетной рабочей температуре  $75^{\circ}\text{C}$ .

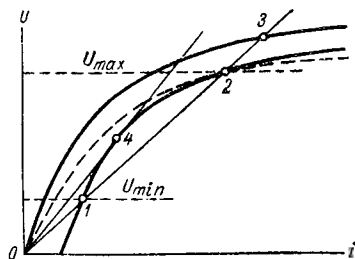


Рис. 2-38. Определение пределов регулирования напряжения по нагрузочной характеристике.

Однако отличие от случая холостого хода состоит в том, что здесь существует не только верхний предел регулирования напряжения, соответствующий вполне выведенному регулировочному реостату, но и нижний предел. Это становится ясно из рис. 2-38, где показаны характеристика холостого хода, нагрузочная характеристика и прямая падения напряжения на обмотке возбуждения при заданной ее температуре, которая пересекает нагрузочную характеристику в двух точках — 1 и 2, а характеристику холостого хода — только в одной точке 3. Точки 2 и 3 являются верхними пределами регулирования напряжения соответственно при данном токе нагрузки и при холостом ходе. Точка 1 является нижним пределом регулирования при данном токе нагрузки; ниже этого предела работа становится невозможной. Предельное значение сопротивления цепи возбуждения, которое может быть достигнуто при регулировании, определяется наклоном касательной к нагрузочной характеристике в точке 4; устойчивой является работа генератора на участке между точками 2 и 4, а между точками 4 и 1 она неустойчива.

Для некоторых видов генераторов постоянного тока, предназначенных для работы на нагрузку с практически постоянным сопротивлением, как, например, для возбuditелей, под нагрузочной характеристикой понимают нередко зависимость напряжения на зажимах от тока возбуждения при неизменной скорости вращения и неизменном сопротивлении нагрузки. Как и в случае нагрузочной характеристики, снятой при неизменном токе нагрузки, интерес представляют пределы регулирования при самовозбуждении; но, в отличие от предыдущего случая, здесь нет не-



устойчивой части характеристики, так как все линии сопротивления, исходящие из начала координат, пересекают данную характеристику не более чем в одной точке (пунктирная кривая на рис. 2-38).

Снятие нагрузочных характеристик при неизменном токе нагрузки может производиться с применением любого способа на-

грузки, но снятие характеристики при работе на постоянное сопротивление было бы весьма неудобно производить иначе, как с поглощением энергии.

Иногда к генераторам с самовозбуждением, работающим на постоянное сопротивление нагрузки, предъявляется требование проверки плавности регулирования напряжения приданными к ним регуляторами возбуждения. Эта проверка может быть совмещена со снятием нагрузочной характеристики в данных условиях, если производить его постепенным

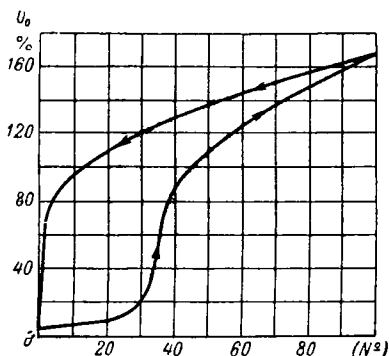


Рис. 2-39. Характеристика самовозбуждения.

перемещением ползуна регулятора с одного контакта на другой, причем сначала от минимального напряжения до максимального, а затем в обратном направлении. Зависимость напряжения на зажимах генератора от номера контакта регулятора называется иногда характеристикой самовозбуждения. Пример такой характеристики дан на рис. 2-39; как видно из нее, вначале напряжение поднимается очень незначительно, но затем, при определенном положении ползуна регулятора, происходит очень быстрое его нарастание, которое в дальнейшем снова замедляется. При обратном движении ползуна ветвь характеристики проходит значительно выше первой и только у самого конца имеет крутой спад.

Резкий подъем напряжения на восходящей ветви характеристики определяется степенью размельчения ступеней регулятора в данном месте, и потому он характерен не столько для машины, сколько для регулятора. Правильнее было бы строить характеристику самовозбуждения в зависимости не от номеров контактов регулятора, а от величины сопротивления, остающейся по ту или другую сторону от ползуна регулятора, когда он находится в данном положении; тогда из характеристики сразу станет ясно, насколько нужно размельчать ступени сопротивления регулятора в том или ином месте.

Однако наличие крутого подъема напряжения вследствие не вполне удачного распределения ступеней регулятора само по себе не является серьезным недостатком ни регулятора, ни тем более машины, так как регулирование напряжения практически никогда не ведется непрерывным перемещением ползуна только в каком-либо одном направлении, и потому, если число ступеней регулятора на рабочем участке регулирования не слишком мало, всегда удастся установить требуемое напряжение с достаточной точностью.

## 2-16. Снятие характеристик при нагрузке в режиме двигателя

Снятие характеристик при нагрузке в режиме двигателя программами типовых и контрольных испытаний ГОСТ 183-55 не предусматривается; из стандартов на специальные виды машин оно предписано только в ГОСТ 2582-50 для тяговых двигателей, но оно нередко требуется техническими условиями.

Рабочая характеристика представляет зависимость скорости вращения от тока нагрузки (или от полезной мощности) при неизменном приложенном напряжении, неизменном сопротивлении цепи возбуждения и расчетной рабочей температуре обмоток. Таким образом, она представляет аналогию внешней характеристики машины в режиме генератора, распространяющуюся и на порядок ее снятия, которое предпочтительнее начинать с номинальной нагрузки или допустимой для данной машины перегрузки, постепенно разгружая двигатель с параллельным возбуждением до холостого хода, а двигатель с последовательным возбуждением — до  $1/4$  номинальной нагрузки по току; все обмотки должны находиться при этом в рабочем соединении.

В качестве примера на рис. 2-40 представлен типичный вид рабочих характеристик двигателя со смешанным возбуждением при различных включениях последовательной обмотки: кривая *a* — без последовательной обмотки, кривая *б* — с согласным включением последовательной обмотки (на подмагничивание) и кривая *в* — с встречным включением (на размагничивание).

Рабочая характеристика двигателя позволяет определить важную величину — номинальное изменение скорости вращения, под которым понимается изменение скорости вращения двигателя при номинальном напряжении на его зажимах

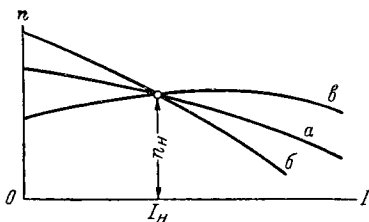


Рис. 2-40. Рабочие характеристики двигателя со смешанным возбуждением.

и при изменении нагрузки: для двигателей, допускающих нулевую нагрузку, т. е. имеющих обмотку параллельного или независимого возбуждения, — от номинальной нагрузки до нулевой, а для двигателей, имеющих чисто последовательное возбуждение,

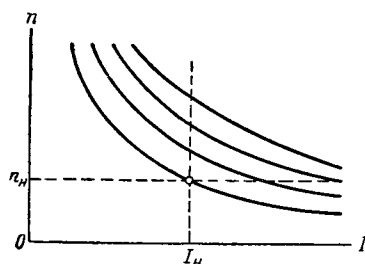


Рис. 2-41. Скоростные характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

не допускающих нулевой нагрузки, — от номинальной нагрузки до одной четверти номинальной нагрузки. Изменение скорости вращения выражается в процентах или в долях номинальной скорости вращения (ГОСТ 183-55, приложение, п. 25).

В применении к двигателям с чисто последовательным возбуждением или к таким двигателям, у которых обмотка параллельного возбуждения достаточна только для ограничения скорости вращения при

холостом ходе, и при изменении их нагрузки происходит весьма сильное изменение скорости вращения, рабочая характеристика иногда получает название скоростной характеристики.

В частности, программа типовых испытаний тяговых двигателей (ГОСТ 2582-50, п. 20) предусматривает снятие скоростных характеристик при номинальном напряжении и при всех основных ступенях регулирования возбуждения, например, посредством шунтировки последовательной обмотки сопротивлениями.

На рис. 2-41 дан пример семейства скоростных характеристик двигателя с чисто последовательным возбуждением.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 30, для номинального изменения скорости вращения двигателей постоянного тока с параллельным и со смешанным возбуждением установлено допустимое отклонение  $\pm 20\%$  от значений, установленных в стандартах, а при отсутствии стандартов — в технических условиях на эти двигатели.

Для всех двигателей, кроме двигателей с независимым возбуждением, основная рабочая характеристика должна сниматься при отсутствии каких-либо регулировочных сопротивлений в цепях возбуждения и при рабочей температуре обмоток. При этом скорость вращения при номинальной нагрузке может отличаться от номинального значения; допустимые отклонения скорости вращения установлены ГОСТ 183-55, п. 30, в следующих размерах:

а) для двигателей с параллельным и смешанным возбуждением мощностью не ниже 1 квт, при значениях отношения номи-

нальной мощности в ваттах к номинальной скорости вращения в оборотах в минуту:

от 0,67 до 2,5:  $\pm 10\%$ ;

от 2,5 до 10:  $\pm 7,5\%$ ;

10 и выше:  $\pm 5\%$ ;

б) для двигателей с последовательным возбуждением мощностью не ниже 1 кВт, включая двигатели с небольшой параллельной стабилизирующей обмоткой, при значениях отношения номинальной мощности в ваттах к номинальной скорости вращения в оборотах в минуту:

от 0,67 до 2,5:  $\pm 15\%$ ;

от 2,5 до 10:  $\pm 10\%$ ;

10 и выше:  $\pm 7,5\%$ .

Однако ГОСТ 2582-50, п. 14, устанавливает для тяговых двигателей иные допускаемые отклонения скорости вращения от номинальной:

для двигателей мощностью до 3 кВт включительно:  $\pm 7,5\%$ ;

свыше 3 кВт до 40 кВт включительно:  $\pm 5\%$ ;

свыше 3 кВт, но работающих в подвижном составе индивидуально:  $\pm 6\%$ ;

для всех двигателей свыше 40 кВт:  $\pm 4\%$ .

Кроме того, п. 15 того же стандарта устанавливает, что у двигателей, предназначенных для вращения в разные стороны, разность между скоростями вращения в одну и в другую сторону при токе, соответствующем номинальной мощности, и при номинальном возбуждении, выраженная в процентах от среднего арифметического обеих скоростей вращения, должна быть для двигателей мощностью до 40 кВт включительно не более 5%, а свыше 40 кВт — не более 4%.

Снятие рабочей характеристики может быть заменено определением изменения скорости вращения при сбросе номинальной нагрузки, что особенно удобно производить при нагрузке испытуемого двигателя тормозом; наиболее благоприятным в данном отношении является электромагнитный тормоз, у которого для этого достаточно снять возбуждение. Однако для двигателей с последовательным возбуждением полный сброс нагрузки производить нельзя.

Регулировочная характеристика представляет зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (или полезной мощности) при неизменной скорости вращения и неизменном приложенном напряжении. Эта характеристика может сниматься как при повышении, так и при понижении нагрузки; но наличие гистерезиса делает эти два направления ведения опыта неравнозначными друг другу совершенно так же, как у регулировочной характеристики в режиме генератора.

На рис. 2-42 дан пример регулировочных характеристик двигателя со смешанным возбуждением при различных включениях

последовательной обмотки, снятых как при повышении, так и при понижении нагрузки.

В случае двигателя с чисто последовательным возбуждением регулировочная характеристика может быть снята как зависимость тока в обмотке возбуждения от тока нагрузки или от полезной мощности; но можно поступить и иначе — строить зависимость тока, отшунтированного от обмотки возбуждения регулирующим сопротивлением, от тех же аргументов. В том и в другом случае зависимость может быть представлена как абсолютная, так и относительная, если ток в обмотке возбуждения или отшунтированный ток выразить в долях тока нагрузки.

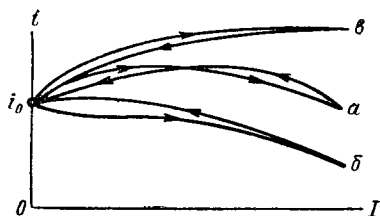


Рис. 2-42. Регулировочные характеристики двигателя со смешанным возбуждением. Обозначения кривых — как на рис. 2-35.

## 2-17. Определение коэффициента полезного действия

Как было указано в § 1-13, непосредственное определение к. п. д. в машинах постоянного тока, как и во всяких других электрических машинах, согласно ГОСТ 183-55, п. 36, допускается для машин с гарантированным значением к. п. д. 50 % и менее и может производиться всеми тремя приведенными там методами.

Сущность этих методов достаточно подробно рассмотрена в § 1-13. Здесь остается только добавить, что во всех формулах для вычисления к. п. д. под мощностью  $P_{1д}$ , подводимой к двигателю, применительно к машинам постоянного тока следует понимать произведение напряжения на зажимах двигателя  $U_d$  на полный потребляемый им ток  $I_d$ , включая ток возбуждения параллельной обмотки, если таковая имеется и если она питается от того же напряжения  $U_d$ :

$$P_{1д} = U_d I_d.$$

Если же параллельная обмотка предназначена для питания от отдельного источника с иным напряжением, то за подводенную к двигателю мощность  $P_{1д}$  следует принимать сумму мощностей, потребляемых цепями якоря и обмотки возбуждения.

Что касается мощности  $P_{2г}$ , отдаваемой генератором, то под ней следует понимать произведение напряжения на зажимах генератора  $U_g$  на ток, отдаваемый генератором во внешнюю цепь

$I_r$ , не учитывающий потребление тока параллельной обмоткой возбуждения, от какого бы источника она ни питалась:

$$P_{2r} = U_r I_r.$$

Для того чтобы учесть потери в обмотке возбуждения генератора в случае ее питания от отдельного источника, эти потери при применении метода измерения мощностей и метода нагрузки для генератора должны быть прибавлены к знаменателю соответствующей формулы в виде произведения номинального напряжения источника питания  $U$  на ток  $i$ , потребляемый обмоткой возбуждения:

$$\eta_r = 100 \sqrt{\frac{P_{2r}}{P_{1d} + U i}}; \quad \eta_r = 100 \frac{P_{2r}}{\eta_r P_{1r} + U i}.$$

Обозначения величин см. в § 1-13.

Оба метода косвенного определения к. п. д., предусмотренные ГОСТ 183-55, находят применение в машинах постоянного тока.

Метод взаимной нагрузки требует, помимо испытываемой машины, наличия еще другой точно такой же машины для осуществления взаимной нагрузки.

Определение к. п. д. этим методом ограничивается однократным измерением мощности, расходуемой парой испытываемых машин на покрытие всех потерь, что, однако, требует соблюдения ряда условий, в том числе предварительного прогрева всех обмоток до температуры, как можно более близкой к  $75^\circ\text{C}$ .

Если при применении схем взаимной нагрузки возбуждение всех машин берется независимым, то измеренная мощность не включает потерь на возбуждение, которые должны быть учтены отдельно.

Согласно стандарту, токи возбуждения обеих машин должны быть установлены так, чтобы при номинальной скорости вращения были выполнены следующие условия:

а) среднее арифметическое токов якорей обеих машин должно равняться номинальному току;

б) напряжение якорных цепей, в зависимости от того, предназначены ли испытываемые машины для работы в качестве генераторов или в качестве двигателей, должно быть больше или меньше номинального напряжения на величину падения напряжения в цепи якоря.

Стандарт указывает, что мощность, необходимая для покрытия потерь, может быть подведена к машинам электрически, механически или частью электрически и частью механически, но не дает более подробных указаний о применяемых схемах. Однако из самой редакции предписаний видно, что в основном имеются в виду схемы с параллельным подключением источника

электрического питания, с которых и начинается здесь рассмотрение этого вопроса, см. § 2-27.

Напряжение  $U$ , приложенное к такой схеме от источника, должно быть установлено, исходя из изложенных выше соображений; но при этом токи в машинах неизбежно получаются разными — ток  $I_d$ , потребляемый двигателем, больше тока  $I_r$ , отдаваемого генератором, на величину тока  $\Delta I$ , подводимого к схеме от источника:

$$I_d = I_r + \Delta I.$$

Стандарт требует, чтобы среднее арифметическое токов  $I_d$  и  $I_r$  равнялось номинальному току, не оговаривая поправки на ток возбуждения, что вносит некоторую неясность.

Если испытываемая машина имеет чисто последовательное возбуждение или предназначена для работы с возбуждением от независимого источника, то при нормальной эксплуатации ток якорной цепи равен потребляемому току в случае двигателя и отдаваемому току в случае генератора.

Но если машина предназначена для работы в режиме генератора с самовозбуждением параллельной обмотки, то ток якорной цепи  $I_a$  при номинальном режиме равен сумме номинального тока  $I_n$  и тока возбуждения  $i_n$ , соответствующего этому режиму:

$$I_a = I_n + i_n.$$

Если же машина предназначена для работы в режиме двигателя с возбуждением параллельной обмотки от общего источника с цепью якоря, то ток цепи якоря  $I_a$  при номинальном режиме меньше номинального потребляемого тока  $I_n$  на величину тока возбуждения  $i_n$ , соответствующего номинальному режиму:

$$I_a = I_n - i_n.$$

Таким образом, в обоих случаях регулированием возбуждения машин должны быть установлены такие токи в генераторе и двигателе, чтобы

$$\frac{I_r + I_d}{2} = I_a.$$

Напряжение, приложенное к схеме, должно быть: в случае, если испытываемая машина является генератором,

$$U = U_n + 2\Delta U + I_a \sum r,$$

и в случае, если она является двигателем,

$$U = U_n - (2\Delta U + I_a \sum r),$$

где  $\Delta U$  — переходное падение напряжения в щетках одной полярности и  $\sum r$  — сумма сопротивлений всех обмоток последовательной цепи, приведенных к расчетной рабочей температуре  $75^\circ\text{C}$ .

При этих условиях искомая сумма потерь испытываемой машины равна:

$$\sum P = \frac{1}{2} U \Delta I + U_n i_n.$$

Результат получается тем более правильным, чем выше к. п. д. машины и чем ближе температура всех обмоток обеих машин к расчетной рабочей температуре  $75^\circ\text{C}$ .

**Пример.** Генератор постоянного тока мощностью  $P_2 = 40 \text{ кВт}$ , с номинальным напряжением  $U_n = 230 \text{ в}$  имеет номинальный ток  $I_n = 174 \text{ а}$  и значение к. п. д., гарантированное по техническим условиям,  $89\%$ . Ток возбуждения при номинальном режиме составляет  $i_n = 2,6 \text{ а}$ ; сопротивления обмоток при  $75^\circ\text{C}$  равны: обмотки якоря  $0,026 \text{ ом}$ , обмотки добавочных полюсов  $0,012 \text{ ом}$ , обмотки последовательного возбуждения  $0,002 \text{ ом}$ .

Требуется определить к. п. д. генератора методом взаимной нагрузки с однопольной машиной.

При номинальном режиме ток в цепи якоря генератора

$$I_{\text{я}} = I_n + i_n = 174 + 2,6 = 176,6 \text{ а}.$$

К схеме взаимной нагрузки должно быть приложено напряжение

$$U = U_n + 2\Delta U + I_{\text{я}} \sum r = 230 + 2 \cdot 1 + 176,6 (0,026 + 0,012 + 0,002) = 239,1 \text{ в}.$$

При этом напряжении измерены следующие токи:

|                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| в цепи якоря генератора | $I_{\text{г}} = 159,0 \text{ а}$ |
| ” ” двигателя           | $I_{\text{д}} = 194,2 \text{ ”}$ |
| ” питания схемы         | $\Delta I = 35,2 \text{ ”}$      |

Токи в цепях якорей генератора и двигателя точно удовлетворяют условию

$$\frac{I_{\text{г}} + I_{\text{д}}}{2} = \frac{159,0 + 194,2}{2} = 176,6 = I_{\text{я}}.$$

Отсюда искомая сумма потерь в генераторе при номинальном режиме

$$\sum P = \frac{1}{2} U \Delta I + U_n i_n = 0,5 \cdot 239,1 \cdot 35,2 + 230 \cdot 2,6 = 4806 \text{ вт}$$

и искомый к. п. д.

$$\eta = 100 \left( 1 + \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \right) = 100 \left( 1 + \frac{4806}{40\,000 + 4806} \right) = 89,27\%.$$

Если применяется схема взаимной нагрузки с вольтодобавочным генератором, то мощность, потребляемая схемой, равна



мощности, отдаваемой вольтодобавочным генератором, т. е. произведению тока  $I$ , проходящего через этот генератор, на напряжение  $U$  на его зажимах, или, правильнее говоря, на разность напряжений на зажимах машин агрегата, к которым подключен вольтодобавочный генератор, так как падение напряжения в соединительных проводниках должно быть исключено.

Ток в цепях якорей должен быть установлен равным току в якоре испытываемой машины при номинальном режиме, т. е. в случае генератора с самовозбуждением

$$I = I_n + i_n,$$

и в случае двигателя с возбуждением от общего источника с якорем

$$I = I_n - i_n,$$

где  $i_n$  — ток возбуждения номинального режима.

Далее, среднее арифметическое из напряжений на зажимах двигателя и генератора должно быть равно э. д. с. в испытываемой машине при номинальном режиме, т. е.

$$\frac{U_d + U_r}{2} = U_n + 2\Delta U + (I_n + i_n) \sum r$$

в случае, если испытываемая машина — генератор, и

$$\frac{U_d + U_r}{2} = U_n - 2\Delta U - (I_n - i_n) \sum r$$

если она — двигатель.

Наконец, сумма потерь равна:

$$\sum P = \frac{1}{2} (U_d - U_r) I + U_n i_n;$$

однако здесь измеряются не напряжения  $U_d$  и  $U_r$  в отдельности, как в случае метода измерения мощности, а прямо их разность

$$U = U_d - U_r,$$

что повышает точность опыта во столько раз, во сколько  $U$  меньше полусуммы  $U_d$  и  $U_r$ .

Таким образом, окончательно:

$$\sum P = \frac{1}{2} UI + U_n i_n.$$

Потери в агрегате могут покрываться механически — двигателем на общем валу агрегата, и тогда они определяются посредством измерения отдаваемой им мощности, для чего этот двигатель должен быть протарирован.

Обе машины нагружаются одним и тем же током  $I$  и на их зажимах имеется одно и то же напряжение  $U_d = U_r = U$ . Поэтому потери в обмотках последовательных цепей уравнены, что же касается потерь в стали, то для того, чтобы их сумма была равна удвоенным потерям в стали испытываемой машины в ее номинальном режиме, напряжение  $U$  должно быть установлено равным ее э. д. с.  $E_n$ ; если это генератор, то

$$U = E_n = U_n + 2\Delta U + (I_n + i_n) \sum r,$$

а если двигатель, то

$$U = E_n = U_n - 2\Delta U - (I_n - i_n) \sum r.$$

Сумма потерь в испытываемой машине равна при этом

$$\sum P = \frac{1}{2} P'_2 + U_n i_n,$$

где  $P'_2$  — мощность, отдаваемая тарированным двигателем.

Метод отдельных потерь не требует наличия пары одинаковых машин и дает представление не только о величине к. п. д. и суммы потерь, но и о составе этой суммы, так как каждое из ее основных слагаемых определяется в отдельности.

Этот метод нуждается в проведении только самых простых опытов с затратой минимальной мощности, но зато при нем приходится производить гораздо больше расчетных операций, чем при предыдущем.

## 2-18. Особенности определения отдельных потерь

Потери в стали и механические (ГОСТ 183-55, п. 43), вместе или по отдельности, берутся из опыта определения потерь холостого хода для значения э. д. с. при том режиме, для которого определяется к. п. д.

Основные потери в цепи якоря (п. 44) определяются подсчетом, как произведение квадрата тока в последовательной цепи на сумму сопротивлений всех ее обмоток, измеренных постоянным током и приведенных к расчетной рабочей температуре  $75^\circ \text{C}$ , кроме тяговых машин с обмотками, изолированными материалами класса В, для которых расчетная рабочая температура принимается равной  $100^\circ \text{C}$  (ГОСТ 2582-50, п. 28).

Потери в переходных контактах щеток (п. 45) вычисляются как произведение соответствующего тока на переходное падение напряжения  $\Delta U$ , принимаемое не зависящим от тока и равным (на каждый из последовательно включенных контактов):

для угольно-графитных, графитных и электрографитированных щеток  $\Delta U = 1 \text{ в}$ ,

для медно-графитных и бронзово-графитных щеток  $\Delta U = 0,3$  в.

В нормальных машинах таких контактов всегда два, но в двухколлекторных машинах с последовательным соединением коллекторов число их возрастает до четырех, а в некоторых машинах специального исполнения может быть и еще больше (например униполярные машины с последовательным включением нескольких якорных обмоток).

Потери на возбуждение (п. 46) при последовательном возбуждении входят в состав основных потерь в обмотках; при параллельном возбуждении они вычисляются как произведение номинального напряжения машины на ток возбуждения при данном режиме и рабочем соединении всех обмоток. Этот ток возбуждения может быть взят из регулировочной или внешней характеристики, если таковые имеются; в противном случае он подлежит расчетному определению на основании опытов холостого хода и короткого замыкания.

При независимом возбуждении, если для его регулирования применяется реостат — «магнитный регулятор», потери на возбуждение определяются как произведение тока возбуждения на номинальное напряжение источника этого тока; причем, если последний находится на одном валу с испытываемой машиной (пристроенный возбудитель), то должны быть учтены и все потери в последнем, кроме механических, которые включаются в счет механических потерь возбуждаемой машины.

Если же регулирование возбуждения осуществляется без помощи магнитного регулятора — посредством изменения напряжения источника, то за потери на возбуждение принимается произведение квадрата тока возбуждения на сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к температуре  $75^{\circ}\text{C}$ , также с учетом потерь в возбудителе, если он пристроенный.

Добавочные потери (п. 47) в машинах постоянного тока отдельно не определяются; при номинальной нагрузке они учитываются приблизительно в размере 1% (в случае некомпенсированных машин) или 0,5% (в случае компенсированных машин) от полезной мощности для генератора и от подводимой мощности для двигателя.

Для более подробного суждения об эксплуатационных свойствах машины может быть поставлена задача определения к. п. д. для различных нагрузок, начиная от холостого хода и до некоторой перегрузки. Как правило, если нет особых оговорок, он определяется из условия неизменного напряжения на зажимах и неизменной скорости вращения, т. е. применительно к условиям снятия регулировочной характеристики.

Вычисление к. п. д. для каждой нагрузки производится точно так же, как и для номинальной, но добавочные потери принимаются изменяющимися пропорционально квадрату тока в

якоря по отношению к их значению при номинальной нагрузке.

Исключение в этом отношении представляют тяговые машины постоянного тока, в которых, согласно ГОСТ 2582-50, п. 28, добавочные потери в зависимости от тока нагрузки должны приниматься равными определенной доле магнитных потерь при холостом ходе по табл. 2-6.

Таблица 2-6

| Ток в процентах от номинального . . . . .                           | 20 | 60 | 80 | 100 | 130 | 160 | 200 |
|---------------------------------------------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Добавочные потери в процентах от магнитных потерь при холостом ходе | 22 | 23 | 26 | 30  | 38  | 48  | 65  |

На рис. 2-43 дан пример построения зависимости к. п. д. и отдельных потерь от тока нагрузки.

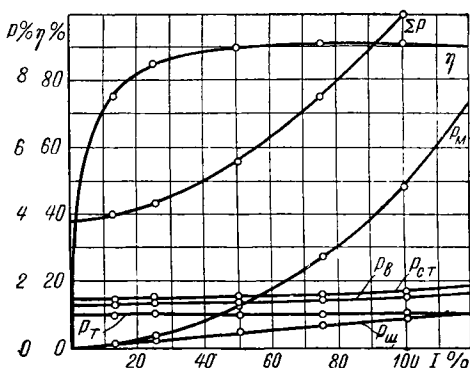


Рис. 2-43. Зависимость к. п. д. и отдельных потерь от тока нагрузки.

**Пример.** Требуется определить к. п. д. генератора постоянного тока из предыдущего примера методом отдельных потерь, если известно, что при опыте холостого хода измерены потери: механические  $P_r = 1070$  вт и в стали якоря при напряжении  $U_0 = 239,1$  в  $P_{ст} = 1135$  вт.

Потери в обмотках последовательной цепи машины

$$P_m = I_a^2 \sum r = 176,6^2 (0,026 + 0,012 + 0,002) = 1248 \text{ вт.}$$

Потери в переходном контакте щеток

$$P_{щ} = 2\Delta UI_a = 2 \cdot 1 \cdot 176,6 = 353 \text{ вт.}$$

Потери на возбуждение

$$P_v = U_n i_n = 230 \cdot 2,6 = 598 \text{ вт.}$$

Добавочные потери

$$P_d = 0,01 P_2 = 0,01 \cdot 40\,000 = 400 \text{ вт.}$$

Сумма потерь

$$\begin{aligned} \sum P &= P_m + P_{ст} + P_r + P_{щ} + P_v + P_d = \\ &= 1248 + 1135 + 1070 + 353 + 598 + 400 = 4804 \text{ вт.} \end{aligned}$$

Отсюда искомый к. п. д.

$$\eta = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \right) = 100 \left( 1 - \frac{4804}{40\,000 + 4804} \right) = 89,27\%.$$

## 2-19. Испытание на нагревание в режиме нагрузки

В процессе испытания может подвергаться непрерывному контролю температура следующих частей машины:

1. Температура всех неподвижных обмоток — по сопротивлению; для этой цели к зажимам каждой обмотки должен быть подключен вольтметр с соответствующим пределом измерения. Поскольку сопротивления всех обмоток последовательной цепи (последовательного возбуждения, добавочных полюсов и т. д.) обычно очень малы, для их измерения приходится применять вольтметры с очень небольшими пределами измерений, имеющие малые внутренние сопротивления. Поэтому на показания этих вольтметров может оказывать очень сильное влияние сопротивление контактов подключающих проводников. Практика испытаний показывает, что для получения вполне надежных показаний необходимо припаивать эти проводники к зажимам обмоток; как ни чрезмерным может показаться это требование, отступления от него почти всегда ведут к ошибкам.

Для определения температуры по показаниям этих вольтметров не могут быть использованы сопротивления обмоток, предварительно измеренные в ненагретом состоянии другими приборами, например, приборами постоянной схемы для измерения сопротивлений, как бы точны они ни были. Поэтому перед началом испытания на нагревание необходимо прежде всего измерить все эти сопротивления именно теми приборами, которые будут применены при испытании, для чего следует быстро поднять нагрузку примерно до номинального значения тока и произвести два-три отсчета при несколько отличающихся друг от друга значениях, не давая при этом обмоткам сколько-нибудь заметно нагреться.

Результаты этих измерений могут более или менее сильно отличаться от предварительных; от них вовсе не требуется а б с о-

лютно й точности, которая преследуется при предварительных измерениях, но лишь правильность относительного изменения сопротивления при переходе от ненагретого состояния к нагретому, на основании которого и определяется температура последнего. Очень хорошо, если имеется возможность повторить измерение сопротивлений в ненагретом состоянии по окончании всех испытаний на нагревание после полного охлаждения всех частей машины; совпадение результатов обоих измерений даст уверенность в правильности определения температуры.

Однако если сопротивления контактов внутри обмотки составляют бо́льшую часть всего ее сопротивления, как это нередко бывает в обмотках добавочных полюсов, обмотках последовательного возбуждения и особенно в компенсационных обмотках, способ сопротивления не дает правильного представления о температуре обмотки и должен быть заменен способом термометра или встраиваемых температурных детекторов.

2. Температура подшипников скольжения (правильнее — их смазочного масла) — по термометрам или температурным детекторам, погруженным в масло.

3. Температура входящего и выходящего воздуха в машинах с искусственной вентиляцией — преимущественно по термометрам, которые должны быть расположены во всех отверстиях для входа и выхода воздуха, не менее чем по два на каждое. С особенной тщательностью следует отнестись к измерению температуры входящего воздуха в случае машин, охлаждаемых воздухом, подводимым по трубам, так как, согласно ГОСТ 183-55, п. 52, именно она принимается в этом случае за температуру охлаждающей среды и к ней должны быть отнесены превышения температуры всех частей машины.

4. В машинах закрытого исполнения измеряется температура корпуса — преимущественно по термометрам, в количестве не менее двух на машину.

5. В отдельных случаях выдвигается требование измерения температуры щеток. Единственно приемлемым для этого можно признать только способ термопары. Для закладки термопары надо высверлить в теле щетки небольшое отверстие на глубину 3—5 мм, в которое законопатить спай термопары при помощи комочка фольги. Термопара не должна препятствовать свободному перемещению щетки в обойме щеткодержателя. Во избежание возможности попадания термопары на поверхность коллектора, ее нужно надежно привязать к тому пальцу траверзы, на котором расположен данный щеткодержатель, оставив только небольшую слабину, необходимую для свободного перемещения щетки. Теплопроводность материала щеток относительно невелика, поэтому целесообразно измерять температуру слоев щетки в непосредственной близости от переходного контакта; для этой цели можно сделать в обойме щеткодержателя прорезь,

внутри которой расположится место заправки спая в тело щетки (рис. 2-44).

Термопара, установленная на щетке, находится под потенциалом последней, поэтому она требует осторожного обращения, в частности вполне надежной изоляции по всей длине.

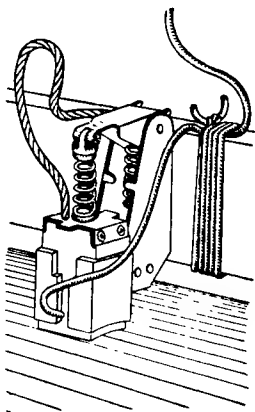


Рис. 2-44. Установка термопары в теле щетки.

Кроме того, переключатель термопар должен быть пригоден для работы при номинальном напряжении машины, в противном случае следует ставить для термопар, находящихся под разными потенциалами, отдельные переключатели со своими измерительными приборами.

6. Температура обмотки якоря может определяться по способу сопротивления с экстраполяцией на момент отключения; но если из-за малости сопротивления и обилия контактов при этом возникают затруднения, то применяется способ термометра или термопары. С этой целью сколо машины перед моментом ее остановки располагается нужное количество персонала с термометрами или термопарами наготове; немедленно

после полного затормаживания якоря термометра или термопары прикладываются к лобовым частям обмотки якоря, по возможности ближе к пазовым частям, и прикрываются комками ваты, пакли или другого мягкого теплоизолирующего материала. Отсчет по термометрам берется в момент их наиболее высоких показаний.

Для сокращения продолжительности подъема столба жидкости в термометрах практикуется предварительный их подогрев путем заблаговременного прикладывания к наиболее нагретым неподвижным частям машины; этим можно заметно повысить правильность показаний. Показания термопар ввиду их незначительной тепловой инерции устанавливаются значительно быстрее, чем показания термометров, но применение их затруднено тем, что обычно нет возможности снабдить каждую термопару своим прибором и приходится применять переключатели; это лишает возможности уверенно призвести отсчет наиболее высоких показаний по всем термопарам.

7. Температура стали сердечника якоря определяется по способам термометра или термопары так же, как и температура обмотки. Обычно речь может идти только о температуре зубцов, поскольку проникнуть к телу якоря не представляется возможным.

8. Температура коллектора также определяется по способам термометра или термопары; но особенно можно рекомендовать применение игольчатых термопар, так как их показания практически безынерционны.

9. В отдельных случаях приходится обращать внимание на температуру бандажей на лобовых частях обмотки якоря, которая определяется также способами термометра или термопары.

Один человек может обслужить нормально только один термометр или две термопары, по одной в каждой руке; таким образом, для измерений после остановки требуется наличие более или менее значительного количества персонала. Чтобы в момент полного затормаживания якоря около машины не произошло сутолоки, могущей сорвать измерения, весь этот персонал должен быть заранее расставлен так, чтобы не мешать друг другу, и хорошо проинструктирован. Еще более целесообразно производить перед началом испытания репетицию остановки, позволяющую каждому участвующему найти наиболее удобное для себя положение без помехи для остальных.

Объем испытаний на нагревание указывается некоторыми из стандартов на отдельные виды машин. Особенно подробно этот вопрос рассмотрен для тяговых машин в ГОСТ 2582-50, п. 20, согласно которому при типовом испытании, например, двигателей для магистральных электровозов предписывается снятие целой сетки кривых нагревания и охлаждения. При этом, согласно п. 22, машины, рассчитанные на кратковременную мощность, например часовую, должны быть испытаны на эту мощность; однако при контрольном испытании допускается для машин мощностью до 40 квт включительно производить испытание в течение 30 мин. при токе, дающем превышение температуры, практически соответствующее превышению температуры при часовом режиме работы. Поэтому в задачу типового испытания должно входить, помимо всего прочего, установление параметров такого режима.

Аналогично этому машины, предназначенные для продолжительного или повторно-кратковременного режима работы, должны при контрольном испытании подвергаться нагреванию в течение одного часа при номинальном напряжении, номинальной скорости вращения и токе, дающем превышение температуры, практически соответствующее номинальному режиму работы.

При этом для машин с независимой вентиляцией допускается при контрольном испытании проводить опыт без вентиляции при номинальном напряжении, номинальной скорости вращения и токе, дающем в этих условиях превышение температуры, соответствующее номинальному режиму работы в номинальных условиях.

Кроме того, при типовом испытании тяговых двигателей с не-



зависимой вентиляцией предписывается производить испытание на нагревание при 100, 75 и 50% номинального расхода охлаждающего воздуха.

Снятие сетки кривых нагревания предписывается производить при номинальном напряжении и номинальном расходе охлаждающего воздуха при токах от 40 до 160% номинального (п. 25); понятно, что чем чаще производятся отсчеты, тем достовернее получаются результаты снятия такой сетки, однако превышение температуры якоря может быть определено только по окончании каждого испытания.

В случае, если вопрос о снятии сетки превышений температуры якоря приобретает принципиальное значение, при котором затраты времени отходят на задний план, такое снятие может быть осуществлено путем проведения испытаний с последовательно нарастающей продолжительностью, после каждого из которых машина охлаждается до практически холодного состояния.

Снятие сетки кривых охлаждения должно производиться при расходе охлаждающего воздуха, равном 100 и 75% номинального, а также при отсутствии вентиляции (п. 26).

## 2-20. Испытание на нагревание косвенным методом

Если почему-либо нельзя применить испытание на нагревание в режиме номинальной нагрузки ни при работе на нагрузочные сопротивления, ни при возвратной работе или взаимной нагрузке, допускается прибегать к косвенным методам испытания на нагревание. Характерным для этого является случай испытания одиночной крупной машины, к которой нельзя подобрать ни парной для осуществления взаимной нагрузки, ни подходящего по мощности приводного двигателя и т. д. для применения возвратной работы. Однако стандарты не дают никаких указаний о том, как следует производить испытание на нагревание косвенным методом.

Принцип испытания на нагревание косвенным методом для машин постоянного тока состоит в том, что производятся отдельные испытания на нагревание в режиме холостого хода и короткого замыкания генератора с целью определения, в какой степени нагревание каждой из частей машины зависит от нагрузки током и от напряжения на зажимах. На основании полученных результатов вычисляются тем или иным способом превышения температуры, которые должны иметь все эти части при номинальной нагрузке.

В простейшем случае достаточно двух испытаний на нагревание: в режиме короткого замыкания при номинальном токе и в режиме холостого хода при номинальном магнитном потоке, в обоих случаях при номинальной скорости вращения.

В режиме короткого замыкания якорь машины нагружен всеми потерями, кроме потерь в стали; поэтому, если бы удалось установить, в какой степени эти последние участвуют в его нагревании, можно было бы предсказать превышения температуры всех его частей при номинальной нагрузке.

В режиме холостого хода якорь совершенно не нагружен током, следовательно, его нагревание определяется только потерями холостого хода, т. е. потерями в стали и механическими. Механические же потери нагревают якорь по-разному. Так, трение якоря о воздух, если оно настолько значительно, что способно заметным образом повлиять на нагревание, остается неизменным при постоянной скорости вращения; то же самое имеет место в отношении потерь на трение в подшипниках, если только по конструктивным особенностям машины эти потери способны в какой-нибудь степени влиять на нагревание остальных частей машины посредством теплопередачи. Но потери на трение щеток на коллекторе, заметно влияющие на температуру якоря, как уже упоминалось, в опыте холостого хода совершенно не те, какие имеют место в опыте короткого замыкания или при номинальной нагрузке. Поэтому необходимо их устранить из опыта, что проще всего сделать, подняв все щетки во время опыта нагревания в режиме холостого хода.

Для установления влияния всех остальных механических потерь может быть проделан опыт нагревания в режиме холостого хода без возбуждения, также с поднятыми щетками; впрочем, в этом режиме встречается надобность лишь в редких случаях, главным образом в особо быстроходных машинах.

Превышение температуры каждой части якоря при номинальной нагрузке может быть после этого определено как сумма превышений температуры этой части при коротком замыкании и при холостом ходе с возбуждением, в случае надобности уменьшенная на величину превышения температуры при холостом ходе без возбуждения.

Такое определение не отличается особой строгостью в сравнении с применяемым при испытании синхронных машин косвенным методом, как это описано ниже в § 3-16. Причина этого состоит в том, что превышения температуры частей якоря машины постоянного тока гораздо труднее поддаются измерениям, нежели превышения температуры частей статоров и роторов синхронных машин. Действительно, применение в якорях машин постоянного тока заложённых или встраиваемых температурных детекторов крайне затруднено, а измерение превышения температуры обмотки по методу сопротивления отличается невысокой точностью как вследствие малости сопротивления и трудности правильного его измерения, так и по причине невозможности производить это измерение на ходу машины.

Все эти рассуждения предполагают, что на нагревание якоря

не оказывает влияния на нагревание неподвижных частей машины; в большей части машин постоянного тока это предположение недалеко от действительности.

Но этого совершенно нельзя сказать о нагревании неподвижных частей, которые омываются воздухом, выходящим из вентиляционных каналов якоря. При опыте короткого замыкания ток в обмотке параллельного возбуждения очень невелик, но в обмотке добавочных полюсов, в обмотке последовательного возбуждения, в компенсационной обмотке, если они имеются, он равен номинальному; поток тепла, выносимого вентиляционным воздухом из якоря, меньше, чем при номинальной нагрузке, так как в его создании не участвуют потери в стали якоря, практически отсутствующие в режиме короткого замыкания. Таким образом, обмотка параллельного возбуждения нагревается почти исключительно теплом, приносимым к ней со стороны.

Напротив, при холостом ходе поток тепла, выходящий из якоря, относительно невелик, так как определяется одними лишь потерями в стали; неподвижные обмотки последовательной цепи совершенно не выделяют тепла, так как никакого тока в них нет; следовательно, нагревание обмотки параллельного возбуждения определяется почти целиком теплом, выделяющимся в ней самой. Но ток возбуждения при холостом ходе, вообще говоря, отличается от тока возбуждения при нагрузке, так как он установлен таким, чтобы только создать магнитные нагрузки в якоре, соответствующие номинальному режиму. Все это порождает затруднения для предопределения превышений температуры неподвижных обмоток при номинальном режиме на основании режимов короткого замыкания и холостого хода.

Если произвести дополнительно испытание на нагревание в режиме холостого хода при токе возбуждения, соответствующем номинальному режиму, и пренебречь тем обстоятельством, что поток, а вместе с ним и потери в стали якоря при этом отличны от имеющих место при номинальном режиме, то превышение температуры обмотки параллельного возбуждения при номинальном режиме может быть принято равным сумме превышений температуры при таком режиме холостого хода и при режиме короткого замыкания (в случае надобности — также с учетом превышения температуры при холостом ходе без возбуждения).

Аналогично можно поступить и в отношении всех остальных неподвижных обмоток.

Идя далее по пути упрощений, если почему-либо нежелательно проводить дополнительное испытание в режиме холостого хода, можно удовольствоваться одним режимом при потоке, равном потоку при номинальной нагрузке, и пересчитать полученное при нем превышение температуры обмотки параллельного возбуждения пропорционально квадрату тока возбуждения.

Нельзя не отметить относительность обоснования приведенных здесь рассуждений. В зависимости от особенностей случая справедливость их может быть подвержена значительным колебаниям и потому вызывать разногласия.

Не имея возможности подвергнуть здесь вопрос об испытании на нагревание косвенным методом более подробному рассмотрению, можно лишь сказать, что всякий спор о правильности примененного способа предопределения превышения температуры имеет смысл только тогда, когда это последнее получается близким к предельно допустимому. Если же из всех опытов становится ясно, что данная обмотка имеет запас по нагреванию, ошибка в предопределении ее температуры в несколько градусов в ту или иную сторону теряет остроту.

## 2-21. Оценка степени искрения

Всякий работавший с машинами постоянного тока знает, насколько разнообразные виды имеет искрение щеток на коллекторе. Известно также, что видимое искрение не определяет пригодности или непригодности машины для эксплуатации, которая зависит от состояния коллектора и щеточного аппарата. Нередко встречаются машины, работающие вполне исправно неопределенно долгое время без какого-бы то ни было ухудшения состояния контактных поверхностей, несмотря на наличие более или менее заметного искрения. Напротив, зачастую искрение, едва видимое на первых порах, а иногда и вовсе невидимое, вызывает изменения поверхности коллектора, которые, накапливаясь с течением времени, ведут к дальнейшему усилению искрения и прогрессивно доводят машину до совершенно неработоспособного состояния.

Кроме того, сплошь и рядом доступной для осмотра во время работы машины является только часть всех щеток, притом иногда очень небольшая, а в отдельных случаях вообще весь щеточный аппарат недоступен для осмотра.

По этой причине ГОСТ 183-55, п. 18, устанавливает оценку степени искрения или класса коммутации не столько по видимому искрению, сколько по производимому им результату, и, во всяком случае, не ставит оценку в зависимость от числа щеток, под которыми наблюдается искрение. Для этой цели принята шкала, состоящая из пяти степеней.

Степень искрения 1 характеризуется полным отсутствием искрения, или, как принято говорить, «темной коммутацией», и в пояснениях не нуждается.

Степень искрения 1 $\frac{1}{4}$  характеризуется слабым точечным искрением под небольшой частью щетки. Такая оценка не является определенной, так как суждение о том, что следует называть «слабым точечным искрением», субъективно. По этой при-

чине стандарт для первых двух степеней искрения указывает, что состояние коллектора и щеток при них должно характеризоваться отсутствием почернения на коллекторе и нагара на щетках.

Степень искрения  $1\frac{1}{2}$  характеризуется слабым искрением под большей частью щетки; при ней могут появляться уже следы почернения на коллекторе (однако лишь в такой мере, что они легко устраняются протиранием поверхности коллектора бензином) и следы нагара на щетках.

Степень искрения 2 характеризуется искрением под всем краем щетки и появлением следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках.

Степень искрения 3 характеризуется значительным искрением под всем краем щетки и наличием крупных и вылетающих искр, значительным почернением на коллекторе, не устраняемым протиранием поверхности коллектора бензином, подгаром и разрушением щеток.

Условия работы различных машин очень разнообразны, и потому не может быть одного общего подхода к установлению допустимой степени искрения. То, что допустимо для машины, предназначенной для кратковременного режима работы, притом редко повторяющегося в эксплуатации данной машины, не может быть приемлемо для машины, предназначенной для продолжительного режима работы. Поэтому, согласно указанию стандарта, степень искрения должна быть указана в стандартах на отдельные виды машин, а при отсутствии стандартов — в технических условиях на эти машины; если же она не оговорена, то при номинальном режиме работы машины она должна быть не выше  $1\frac{1}{2}$ .

Вне зависимости от этого, степень искрения 2 допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки, а степень искрения 3 — для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, и то лишь при условии, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы, т. е. если почернение поверхности коллектора и подгар щеток сами постепенно устраняются при дальнейшей работе.

При оценке степени искрения принимается во внимание только искрение под сбегающим краем щетки; незначительное искрение, наблюдаемое иногда под набегающим краем щетки, не должно учитываться. Причиной этого искрения является вибрация щеток со звуковой частотой, происходящая большей частью от неправильной обработки коллектора, главным образом от шлифовки его мягкими материалами (стеклянной бумагой или полотном), при которой, как было указано в § 2-4, поверхность каждой пластины становится горбатой (см. рис. 2-10). Мощность, выделяемая этим искрением, совершенно ничтожна, и по-

тому оно безвредно как для поверхности коллектора, так и для щеток, не оставляя на них никаких следов. С течением времени, по мере обтачивания поверхности коллектора щетками, это искрение обычно исчезает.

Появление следов почернения на коллекторе и нагара на щетках требует некоторого времени; во всяком случае, судить об его отсутствии при продолжительном или повторно-кратковременном режиме работы машины можно не раньше, чем когда коллектор и щетки достигнут практически установившейся температуры. Это обстоятельство и отмечено стандартом, причем им установлена наименьшая продолжительность времени для машин мощностью до 100 кВт включительно в размере двух часов, а для машин мощностью более 100 кВт — четырех часов. Сложнее обстоит дело при кратковременном режиме, при котором температура коллектора и щеток может не достигать установившихся значений. В этом случае стандарт предписывает производить проверку состояния поверхности коллектора и щеток после нескольких циклов работы (начиная с ненагретого состояния), общей продолжительностью не менее двух часов — для машин мощностью до 100 кВт включительно и не менее четырех часов — для машин мощностью более 100 кВт.

Малая продолжительность работы машины под нагрузкой на стенде испытательной станции не дает полной уверенности в исправности ее коммутации, так как для достижения установившегося состояния коллектора и щеток, как правило, требуется гораздо более длительное время.

Поэтому электромашиностроительные заводы подходят к вопросу о допустимой степени искрения строже, чем это установлено стандартом, и стремятся выпускать машины со степенью искрения не выше I, а в крайнем случае, да и то главным образом для машин с исключительно трудными условиями коммутации, — со степенью искрения не выше I<sup>1</sup>/<sub>4</sub>.

Другим средством, позволяющим убедиться в исправности коммутации, является испытание на кратковременную перегрузку по току, входящее в программу контрольного испытания; наконец, третьим, наиболее действительным средством является определение области безискровой коммутации, входящее в программу типового испытания.

## 2-22. Кратковременная перегрузка по току

Согласно ГОСТ 183-55, п. 15, все машины постоянного тока, предназначенные для продолжительного и повторно-кратковременного номинального режима работы, должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать в нагретом состоянии перегрузку полуторакратным номинальным током в течение 1 мин, а возбудители с отношением предельного напряжения к

номинальному более 1,6 — перегрузку двукратным номинальным током возбуждения возбуждаемой машины в течение 50 сек; однако возбудители турбогенераторов, спроектированные до срока введения ГОСТ 533-51, а также возбудители гидрогенераторов, спроектированные до срока введения ГОСТ 5616-50, допускается испытывать при перегрузке двукратным номинальным током возбуждения возбуждаемой машины только в течение 30 сек.

Полуторакратный и даже двукратный номинальный ток далеко не достаточен для того, чтобы можно было опасаться поломки вала или повреждения обмоток машины электродинамическими усилиями; но, будучи произведена при нагретом состоянии машины, такая перегрузка может вызвать нарушение паяных контактов обмоток, в первую очередь петушков коллектора. Кроме того, при перегрузке машин с последовательным возбуждением или со смешанным возбуждением при согласном включении обмоток возможны смещение или изгибание вала якоря под влиянием возросшего тяжения магнитного поля, результатом чего может являться задевание полюсных башмаков якорем или обойм щеткодержателей коллектором.

Однако не в этом состоит основной смысл испытания на кратковременную перегрузку по току: в программе испытаний генераторов и двигателей постоянного тока (ГОСТ 183-55, п. 33, е) прямо указано, что назначением его является проверка коммутации.

Поскольку это испытание должно производиться в нагретом состоянии машины, целесообразно выполнять его по окончании испытания на нагревание в случае типового испытания, и по окончании испытания при номинальной нагрузке в течение не менее 60 мин, которое входит в программу контрольных испытаний для машин мощностью до 100 кВт включительно. Что касается машин более крупных мощностей, то электромашиностроительные заводы, как правило, расширяют для них программы типовых испытаний почти до полного объема программы типовых испытаний и, во всяком случае, стремятся прогревать такие машины до установившейся температуры.

Способ осуществления перегрузки может не отличаться от способа предшествовавшей ей нагрузки; но напряжение при испытании на кратковременную перегрузку по току стандартом не оговорено, и потому оно может быть понижено против того, при котором производилась нагрузка, если по недостаточной мощности оборудования поддержать его затруднительно. Более того, в программе испытаний указано, что это испытание допускается проводить в режиме короткого замыкания.

При наличии более или менее сильной последовательной обмотки, включенной встречно, двигатель может недопустимо повысить скорость вращения; поэтому, если опыт производится в

режиме двигателя, следует либо отключать обмотку последовательного возбуждения, либо включать ее согласно; однако при понижении напряжения может не удастся удержать номинальную скорость вращения вследствие чрезмерно сильного намагничивания машины последовательной обмоткой.

Нельзя требовать, чтобы степень искрения при перегрузке по току была той же, что и при номинальной нагрузке; по этой причине обычно она допускается на одну степень выше. Так, например, если при номинальной нагрузке допустима степень искрения  $1\frac{1}{4}$ , то при перегрузке следует считать удовлетворительным, если искрение не превосходит степени  $1\frac{1}{2}$ .

Составить суждение о степени искрения при перегрузке на основании  $1\text{ мин}$  или  $50\text{ сек}$  работы машины довольно затруднительно, так как столь небольшие промежутки времени могут быть недостаточны для образования почернения на коллекторе и нагара на щетках, а если они и появятся, то нелегко решить вопрос об устранимости их путем протирания бензином. Если судить о степени искрения на основании зрительных впечатлений, то расхождение субъективных оценок почти неизбежно. Однако можно считать, что если по окончании перегрузки снова установить номинальную нагрузку, и при этом в точности восстановится степень искрения, имевшая место до перегрузки, то степень искрения при перегрузке была не выше  $1\frac{1}{2}$ . Если же такое восстановление наступит спустя некоторое время, например в пределах сроков, оговоренных стандартом для проверки степени искрения, то надо считать, что степень искрения при перегрузке была не выше 2, так как в противном случае нельзя надеяться на достаточно быстрое самоустранение последствий искрения.

Для машин с кратковременным номинальным режимом работы испытание при перегрузке по току не установлено, кроме тяговых машин и крановых, подъемно-транспортных и металлургических двигателей (см. ниже). Равным образом это испытание не может быть проведено в соответствии со стандартом для тех машин с повторно-кратковременным режимом работы, у которых продолжительность рабочего периода меньше одной минуты.

Для тяговых машин, согласно ГОСТ 2582-50, п. 30, проверка коммутации производится: для тяговых двигателей — двукратным номинальным током при номинальном напряжении, а для тяговых генераторов — максимально допустимым током согласно техническим условиям на данные генераторы и при том напряжении, которое соответствует этому току по рабочей характеристике генератора; для нереверсивных машин проверка производится в течение  $1\text{ мин}$ , а для реверсивных — по  $30\text{ сек}$  при каждом направлении вращения с допустимым холостым ходом между обоими испытаниями не свыше  $5\text{ мин}$  для приработки



щеток. Степень искрения этим стандартом не оговаривается, требуется лишь, чтобы во время испытания не было механических повреждений или кругового огня и чтобы коллектор был пригоден к дальнейшей работе без очистки или какого-либо исправления. Для тяговых генераторов мощностью свыше 100 кВт проверку коммутации допускается производить при коротком замыкании.

Для крановых, подъемно-транспортных и металлургических двигателей, согласно ГОСТ 184-53, п. 22, кратность тока при проверке коммутации устанавливается, в зависимости от системы возбуждения и номинального напряжения, от 2,25 до 3,2 по отношению к номинальному току закрытого двигателя с естественным охлаждением при  $PВ = 25\%$ .

## 2-23. Определение области безискровой коммутации

Трудность установления правильной коммутации заключается в том, что она зависит от многих обстоятельств, разделить влияние которых не всегда легко. Основными из этих обстоятельств являются следующие:

- 1) правильность выбора данных для добавочных полюсов (и компенсационной обмотки, если она имеется);
- 2) соответствие примененных марки и размеров щеток условиям работы машины;
- 3) удовлетворительность состояния машины в механическом отношении:
  - а) отсутствие вибрации и биения коллектора;
  - б) правильность расстановки щеток по окружности коллектора;
  - в) жесткость траверзы и других деталей щеточного аппарата и устойчивость их против температурных деформаций;
  - г) равномерность нажима щеткодержателей;
  - д) тщательность приработки щеток к поверхности коллектора;
  - е) состояние поверхности коллектора.

Существует немало способов исследования коммутации; но ни один из них не дает такого полного и ясного представления о происходящем, как способ определения области (или, как часто, хотя и неправильно, говорят, «зоны») безискровой коммутации, подробно разработанный В. Т. Касьяновым. Достоинствами этого способа являются простота, доступность применения в обстановке промышленного испытания и ясность даваемых им результатов. Хотя непосредственно он дает ответ только на вопрос о правильности выбора данных для добавочных полюсов, но косвенно им освещаются также и другие обстоятельства, влияющие на коммутацию.

Сущность метода состоит в том, что при различных нагрузках, начиная от холостого хода и до номинальной, а если воз-

можно, то и выше номинальной, определяются верхний и нижний пределы намагничивающей силы добавочных полюсов, между которыми коммутация остается темной; область, ограниченная этими пределами, и носит название области безискровой коммутации. В обе стороны за пределами этой области безискровая работа невозможна.

Изменение намагничивающей силы добавочных полюсов может производиться следующими способами:

1. Независимое питание обмотки добавочных полюсов от самостоятельного источника постоянного тока; для этого, очевидно, обмотка должна быть отключена от остальных цепей испытываемой машины. Такой способ особенно пригоден для испытания относительно небольших машин высокого напряжения, в крупных же машинах с токами в сотни и тысячи ампер применение его затруднительно, так как для него требуется источник постоянного тока очень низкого напряжения, но с номинальным током того же порядка, что и испытываемая машина.

2. Дополнительное питание обмотки добавочных полюсов, нормально включенной в последовательную цепь машины, от самостоятельного источника, который подключается к ее выводам.

Таким образом, источник должен доставить не весь ток обмотки добавочных полюсов, а только разность между тем током нагрузки, при котором производится данный отсчет, и токами в обмотке добавочных полюсов, соответствующими границам области безискровой работы. Этот способ наиболее легко осуществим и находит повсеместное применение; при высоком напряжении приходится либо заземлять, либо, наоборот, надежно изолировать от земли источник дополнительного питания с его двигателем.

3. Питание временной обмотки, наложенной на добавочные полюса помимо постоянной обмотки, от самостоятельного источника либо от самой машины. Этот способ соединяет в себе преимущества обоих предыдущих и дает известную свободу в выборе источника питания, так как число витков временной обмотки может быть взято произвольным. Тем не менее применимость его ограничена трудоемкостью наложения временной обмотки, а подчас и полной его невозможностью, если промежутки между главными и добавочными полюсами слишком малы.

По этим причинам все дальнейшее изложение ориентируется на второй способ — дополнительное питание обмотки добавочных полюсов.

Определение области безискровой коммутации может производиться как в режиме нагрузки, так и в режиме короткого замыкания; а так как последнее много проще, а при высоком напряжении машины — и безопаснее для обслуживающего пер-

сонала, то зачастую, в особенности на крупных машинах, нагрузка которых при испытании на заводе-изготовителе встречает большие затруднения, предпочитается проводить его в режиме короткого замыкания.

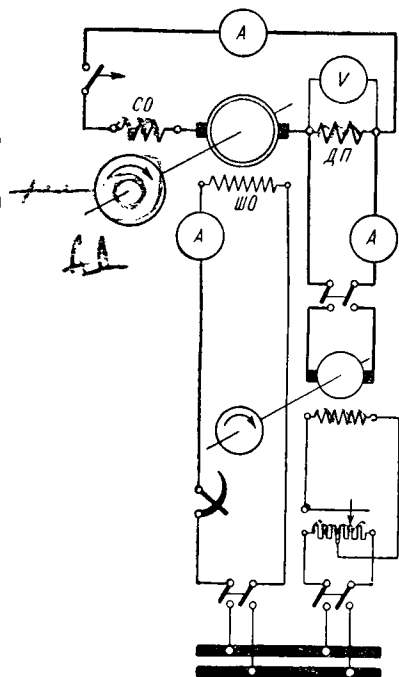


Рис. 2-45. Схема опыта дополнительного питания добавочных полюсов.

На рис. 2-45 показана схема включения источника дополнительного питания. Для того чтобы управление его током было вполне устойчивым, необходимо давать ему независимое возбуждение; а чтобы была возможность изменения направления этого тока, следует иметь переключатель направления возбуждения, а еще лучше — применять показанную там потенциометрическую схему. Очень удобно, если амперметр в цепи тока дополнительного питания имеет шкалу с нулем в середине шкалы; в противном случае приходится его переключать при каждом изменении направления этого тока. Полезно также иметь вольтметр на зажимах обмотки добавочных полюсов, так как по его показаниям можно в любой момент проверить, совпадает ли дополнительный ток по направлению с основным («положительное дополнительное питание»), или они направлены друг другу навстречу («отрицательное дополнительное питание»).

Опыт лучше всего начинать с холостого хода испытываемой машины. При разомкнутой цепи якоря в обмотку добавочных полюсов подается питание произвольного направления. Ток питания постепенно увеличивается до тех пор, пока не будет замечено появление искрения под сбегаящими краями щеток.

Чтобы по возможности исключить влияние субъективности оценки степени искрения, следует за границу искрения принимать появление первой искры, которую удастся заметить, поскольку одна лишь степень искрения 1 представляется вполне объективной. Конечно, даже и при этом трудно добиться полной одинаковости оценки начала искрения не только разными лицами (в силу различия их остроты зрения и т. д.), но и одним

и тем же лицом; так, например, результат зависит от освещенности поверхности коллектора, в частности от того, производится ли испытание при дневном свете или искусственном. Понятно, что чем слабее освещение, тем раньше может быть замечена первая искра.

Если теперь начать понижать ток питания, то можно убедиться в том, что замеченная искра гаснет не сразу; будучи раз вызвана, она продолжает оставаться и при несколько меньшем токе питания, и только путем повторения небольших увеличений и уменьшений последнего удается с достаточной точностью определить границу искрения.

После этого дополнительное питание снижается до нуля, направление его изменяется на обратное, и снова таким же способом устанавливается граница искрения.

Токи, соответствующие обеим границам искрения, должны быть по абсолютной величине примерно равны друг другу; в противном случае приходится предполагать какую-либо ненормальность в щеточном аппарате машины; особенно в этом отношении следует опасаться налета меди на рабочих поверхностях щеток.

Далее следует, не изменяя тока питания обмотки добавочных полюсов, замкнуть цепь якоря и нагрузить последний током порядка 20—25% номинального. Если в процессе подъема этого тока окажется, что искрение склонно усиливаться, нужно параллельно с этим уменьшить ток дополнительного питания, не давая искрению развиваться, так как вызвать его много легче, чем уничтожить.

После проделанного по-предыдущему установлению границы искрения при этой нагрузке якоря ток дополнительного питания уменьшается до нуля, направление его изменяется на обратное и т. д., как было описано выше. Попутно выясняется, какое направление тока дополнительного питания является совпадающим с током цепи якоря («положительное питание»); об этом позволяет судить вольтметр на зажимах обмотки добавочных полюсов, показание которого при неизменном токе короткого замыкания возрастает вместе с увеличением тока положительного питания и убывает с увеличением тока отрицательного питания.

Кроме того, о знаке питания можно судить и по компаундирующему действию добавочных полюсов; увеличение тока в обмотке добавочных полюсов вызывает возрастание тока короткого замыкания при неизменном токе возбуждения.

Повторяя все эти операции при постепенно возрастающих токах нагрузки, можно получить два ряда точек, определяющих верхнюю и нижнюю границы области безискровой работы, как это схематически представлено на рис. 2-46.

Без особенной ошибки можно считать, что для каждого значения тока нагрузки наилучшая коммутация будет определяться

точкой, лежащей в середине между верхней и нижней границами искрения. Линия, соединяющая такие точки для различных значений тока нагрузки, носит название средней линии области безискровой коммутации.

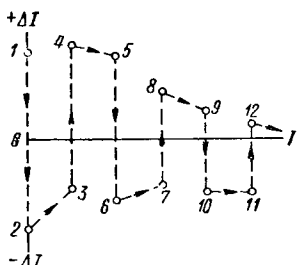


Рис. 2-46. Схема ведения опыта дополнительного питания до-бавочных полюсов.

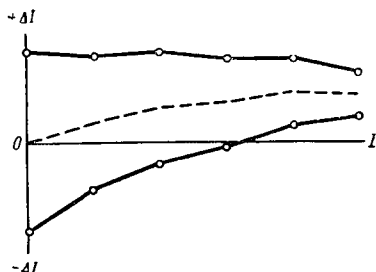


Рис. 2-47. Область безискровой коммутации при слишком слабых добавочных полюсах.

Суждение о коммутации может быть высказано на основании трех признаков.

1. Величина отклонения средней линии от оси абсцисс; чем меньше это отклонение, тем удачнее выбор основных данных добавочных полюсов: числа витков их обмотки (включая также и компенсационную обмотку) и зазора между

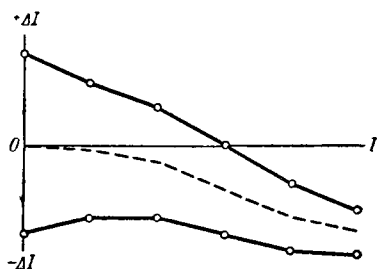


Рис. 2-48. Область безискровой коммутации при слишком сильных добавочных полюсах.

ними и якорем. Идеальным является случай, когда средняя линия совпадает с осью абсцисс на всем своем протяжении. Отклонение ее от оси абсцисс вверх (рис. 2-47) свидетельствует о том, что добавочные полюса слишком слабы — требуется усиление их действия током положительного дополнительного питания, равносильное увеличению числа витков или уменьшению зазора. Наоборот, отклонение средней линии вниз

(рис. 2-48) указывает на то, что добавочные полюса чрезмерно сильны и действие их приходится ослаблять, в опыте — током отрицательного дополнительного питания, а после него — уменьшением числа витков или увеличением зазора.

2. Ширина области безискровой коммутации; чем она больше при каждой данной нагрузке, тем надежнее и устойчивее безискровая коммутация. Эта ширина зависит от многих факторов. Так, например, она меняется при изменении ширины полюсных башмаков добавочных полюсов. Поскольку подробности процесса коммутации крайне трудно поддаются расчету, при выпуске крупных ответственных машин приходится производить опытную доводку коммутации, в частности подбор наиболее благоприятной ширины полюсных башмаков. Для этой цели последние делаются съемными и производится определение области безискровой коммутации при башмаках различной ширины. Тот комплект башмаков является наиболее подходящим, для которого ширина области безискровой коммутации при прочих равных условиях наибольшая.

Для примера на рис. 2-49 представлена серия областей безискровой коммутации, снятых на одной крупной машине; ширина области безискровой коммутации изменялась в зависимости от ширины полюсных башмаков, и положение средней линии также не оставалось неизменным.

Чрезвычайно важным является вопрос о надлежащем подборе марки и ширины щеток; в ответственных случаях имеет смысл произвести определение области безискровой коммутации для различных марок или размеров щеток, которые могут быть применены. Чем больше ширина области безискровой коммутации, тем лучше подходят данные щетки к условиям работы машины.

Аналогичным образом может быть подвергнуто исследованию влияние на коммутацию и других факторов, как, например, материала и размеров бандажей на лобовых частях обмотки якоря, нажима щеткодержателей, способа обработки коллектора и т. д. Однако для того, чтобы можно было получать надежные результаты таких сравнительных испытаний, необходимо, чтобы все прочие условия оставались во всех опытах неизменными; в частности, следует обращать особое внимание на приработку щеток к поверхности коллектора, от которой ширина области

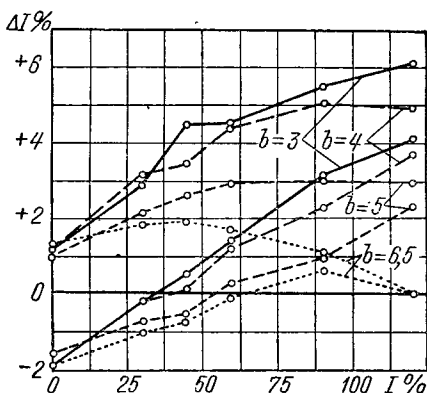


Рис. 2-49. Зависимость области безискровой коммутации от ширины башмаков добавочных полюсов.

безискровой коммутации зависит чрезвычайно сильно, и на состояние поверхности коллектора. Образующийся на последней блестящий цветной налет, или «политура», в зависимости от марки щеток и других условий приобретающий цвет от светло-лилового до иссиня-черного, если на нем нет матово-серых или черных следов подгара, свидетельствует об исправности коммутации и сам ей способствует; если он к моменту данного испытания выработался на всей поверхности коллектора, необходимо всеми мерами стремиться к его сохранению. В частности, при определении области безискровой коммутации не следует допускать сильного или продолжительного искрения; несоблюдение этого немедленно ведет к сужению области.

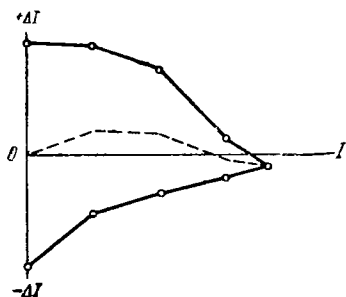


Рис. 2-50. Область безискровой коммутации механически неисправной машины.



Рис. 2-51. Область безискровой работы с сильно искривленной средней линией.

Если отклонение средней линии от оси абсцисс значительно, а ширина области безискровой коммутации относительно невелика, то при некотором значении тока нагрузки якоря один из пределов искрения пересекает ось абсцисс (рис. 2-47 и 2-48). При более высоких токах нагрузки оба предела безискровой коммутации получаются при токе дополнительного питания одного и того же направления; следовательно, безискровая коммутация без дополнительного питания дальше становится уже невозможной.

Обычно ширина области безискровой коммутации уменьшается по мере повышения тока нагрузки; если машина механически вполне исправна, это уменьшение происходит очень постепенно, поэтому быстрое схождение верхнего и нижнего пределов искрения до пересечения (рис. 2-50) может считаться достаточно ясным признаком наличия каких-либо механических неисправностей, преимущественно из числа тех, которые вызывают вибрацию щеток,

3. Кривизна средней линии области безискровой коммутации может служить мерилем компенсированности машины. Как показывает опыт, чем лучше компенсирована машина, тем ближе средняя линия к прямой; в некомпенсированных машинах обычная форма средней линии имеет вид, показанный на рис. 2-51: сначала выпуклость ее направлена вверх, а затем, при более высоких значениях тока, меняется на обратную.

По этой причине в некомпенсированных машинах не представляется возможным обеспечить одинаково надежную коммутацию при всех нагрузках; если, например, средняя линия рас-

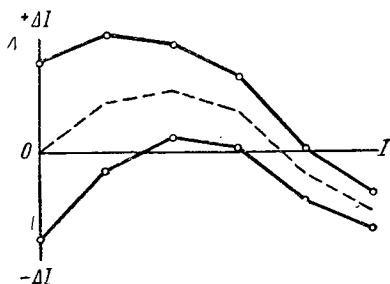


Рис. 2-52. Двойное пересечение оси абсцисс областью безискровой коммутации.

полагается близко от оси абсцисс в некоторых пределах около номинальной нагрузки, то при небольших нагрузках она более или менее значительно отклоняется вверх, в сторону положительного питания. Если это выражено очень резко, то может получиться так, как представлено на рис. 2-52; нижний предел искрения дважды пересекает ось абсцисс и машина ведет себя на первый взгляд совершенно необычным образом: без дополнительного питания она обнаруживает искрение на промежутке между этими двумя пересечениями; как при более низких нагрузках, так и при более высоких искрение исчезает, но затем, при еще более высоких нагрузках, возникает снова. Без снятия области безискровой коммутации такое поведение машины было бы совершенно непонятно.

Опыт показывает, что в большинстве машин ширина области безискровой коммутации практически не зависит от напряжения; но этого нельзя сказать о положении ее средней линии: по мере повышения напряжения в одних машинах она имеет стремление отклоняться вверх, в сторону положительного питания, т. е., иными словами, добавочные полюса при этом ослабевают, в других — наоборот, усиливаются, что проявляется ее отклонением вниз. Указать здесь какие-либо количественные соотношения было бы крайне затруднительно; наиболее верным средством является проверка безискровой коммутации хотя бы только при одной номинальной нагрузке.

Отклонение средней линии области безискровой коммутации при переходе от режима короткого замыкания к режиму нагрузки определяется действием ряда факторов, наиболее существенными из которых являются следующие:



1. Насыщение ярма и тела якоря. На рис. 2-53, *а* представлено схематически распределение магнитных потоков при холостом ходе, а на рис. 2-53, *б* — при коротком замыкании, когда машина намагничивается почти только одними добавочными полюсами, что особенно близко к действительности в компенсированных машинах. Распределение потоков при нагрузке может быть представлено наложением обеих картин друг на друга (рис. 2-53, *в*);

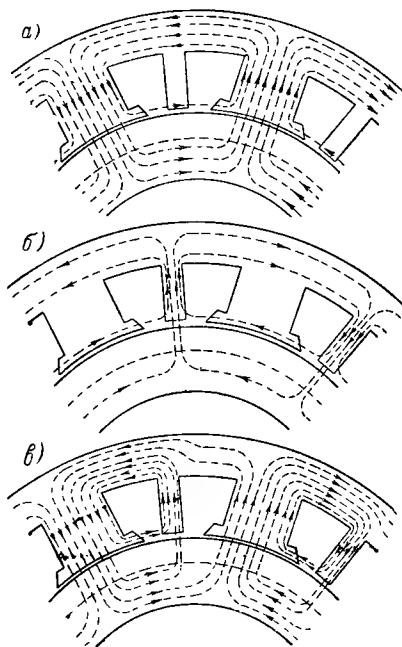


Рис. 2-53. Распределение магнитных потоков главных и добавочных полюсов: *а* — поток главных полюсов; *б* — поток добавочных полюсов; *в* — общий поток.

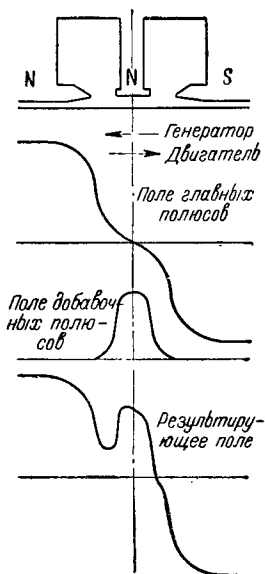


Рис. 2-54. Влияние поля главных полюсов на поле добавочных полюсов.

из этого рисунка видно, что в ярме и теле якоря поток добавочных полюсов оказывается проходящим по таким участкам, которые могут быть насыщены потоком главных полюсов, вследствие чего добавочные полюса ослабляются. Это явление имеет место одинаково и в генераторе, и в двигателе.

2. Влияние поля главных полюсов на поле добавочных полюсов. На рис. 2-54 представлено сложение полей главных и добавочных полюсов в зазоре; из него видно, что поле добавочных полюсов оказывается смещенным: у генератора — по направлению вращения, а у двигателя — против направления вращения. Смещение поля против направления вращения вызывает ускорение коммутации, поэтому добавочные полюса оказываются усиленными; напротив, смещение по направлению вращения замедляет коммутацию, вследствие чего добавочные полюса оказываются ослабленными,

Ширина области безыскровой коммутации, выраженная в долях номинального тока, убывает с возрастанием мощности машины и с увеличением ее скорости вращения; в одной и той же машине при холостом ходе она примерно обратно пропорциональна скорости вращения. Поэтому, если машина имеет несколько номинальных скоростей вращения, опыт дополнительного питания нужно проводить прежде всего при наибольшей из них.

При этом обычно наблюдается такое явление: если добавочные полюса оказываются как раз подходящими при наибольшей из скоростей вращения, то по мере перехода к более низким

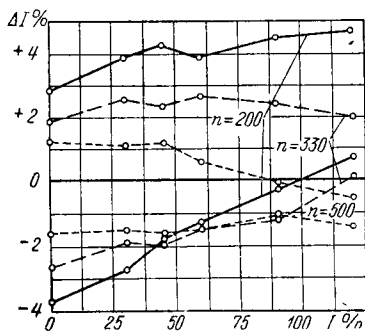


Рис. 2-55. Изменение области безыскровой коммутации в зависимости от скорости вращения.

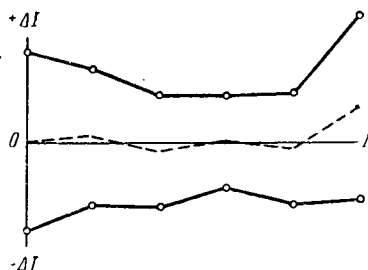


Рис. 2-56. Область безыскровой коммутации при насыщенных сердечниках добавочных полюсов.

скоростям они ослабевают, и наоборот; на рис. 2-55 дан пример областей безыскровой коммутации крупного компенсированного двигателя с регулированием скорости вращения в отношении 1 : 2,5, вполне подтверждающий это положение.

Не превосходя в очень крупных машинах всего лишь нескольких процентов от номинального тока, ширина области безыскровой коммутации может достигать в малых машинах десятков процентов, так как в них безыскровая коммутация обеспечивается гораздо легче, чем в крупных.

По этой причине для небольших машин достаточно характерен вид области безыскровой коммутации, представленный на рис. 2-56, при котором верхний предел безыскровой коммутации уходит в бесконечность. Это значит, что для нарушения коммутации машины требуется настолько значительное увеличение потока добавочных полюсов, что их сердечники насыщаются им, и это проявляется в сильном возрастании тока, необходимого

для его создания. Область безискровой коммутации приняла бы нормальный вид, если бы по оси ординат откладывался не ток дополнительного питания добавочных полюсов, а создаваемое им изменение потока или индукции в зазоре между добавочными полюсами и якорем.

## 2-24. Определение изменения данных для добавочных полюсов

Опыт определения области безискровой коммутации дает основание для суждения о правильности выбора данных для добавочных полюсов. Если результаты его указывают, что добавочные полюса слишком слабы, их следует усилить, и наоборот.

Первым способом усиления или ослабления добавочных полюсов является увеличение или уменьшение числа витков их обмотки.

Если  $w_d$  есть число последовательно включенных витков обмотки добавочных полюсов (а также и компенсационной обмотки в случае, когда она имеется), и если при нагрузке номинальным током  $I_n$  оказалось, что средняя линия области безискровой коммутации отклоняется от оси абсцисс на величину  $\Delta I$ , то для уничтожения этого отклонения потребовалось бы изменить число витков на величину

$$\Delta w_d = \frac{\Delta I}{I_n} w_d,$$

причем если  $\Delta I$  положительно (т. е. добавочные полюса слишком слабы), требуется домотать это число витков, и наоборот.

Однако, не говоря уже о том, что технически трудно отмотать, а тем более домотать витки в обмотке из проводника большого сечения, так как это требует полной разборки машины и переделки катушек, может оказаться, в особенности в крупных машинах, что  $\Delta w_d$  является небольшой дробью. Между тем для осуществления изменения числа витков оно должно быть не только целым, но и кратным по крайней мере числу пар полюсов, разделенному на число параллельных ветвей обмотки, если они имеются, так как правильная коммутация невозможна, если различные пары добавочных полюсов будут иметь разные числа витков.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Следующий случай очень наглядно иллюстрирует это обстоятельство. Четырехполюсный возбудитель турбогенератора в 12 000 кат считался очень спокойным в коммутационном отношении. Однако один из таких возбудителей при испытании обнаружил сильное искрение, которое не устранялось никаким дополнительным питанием добавочных полюсов. Тщательный осмотр машины показал, что в ней имеется неправильность обмотки добавочных полюсов, которая должна была состоять из чередующихся катушек по 10 и по 11 витков, всего 10½ витков на полюс; катушки из 11 и из 10 витков сидели попарно рядом. После расстановки их в чередующемся порядке искрение совершенно прекратилось.

Поэтому изменение числа витков может быть предпринято только в том случае, когда число витков каждой катушки настолько велико, что требуемое его изменение может быть произведено достаточно точно, а это бывает лишь в очень небольших машинах относительно высокого напряжения, когда обмотка добавочных полюсов выполняется проволоочной. В более крупных машинах при обмотках, выполненных из меди прямоугольного сечения, его можно применить лишь в случае очень грубых отклонений средней линии области безискровой работы от оси абсцисс.

Другим способом регулирования добавочных полюсов является изменение зазора посредством стальных прокладок между их сердечниками и ярмом; чем меньше зазор, тем сильнее становятся добавочные полюса, и наоборот.

Для подсчета изменения зазора на основании результатов опыта можно воспользоваться формулой В. Т. Касьянова:

$$\delta' = \frac{\delta}{1 + \frac{\Delta I}{I} \cdot \frac{\theta}{\theta - 1}},$$

где  $\delta'$  — новая и  $\delta$  — прежняя величина зазора,  $I$  — ток нагрузки, для которого желательно отрегулировать добавочные полюса (обычно — номинальный ток), и  $\Delta I$  — соответствующее ему отклонение средней линии области безискровой коммутации от оси абсцисс;  $\theta$  представляет отношение намагничивающей силы добавочных полюсов и компенсационной обмотки к намагничивающей силе реакции якоря:

$$\theta = \frac{2p(w_d + w_k)I}{\frac{N}{4a}Ia_d} = \frac{8pa(w_d + w_k)}{Na_d},$$

где  $p$  — число пар полюсов;  
 $a$  — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;  
 $w_d$  — число витков на одном добавочном полюсе;  
 $w_k$  — число витков компенсационной обмотки вокруг одного добавочного полюса;  
 $N$  — общее число проводников на якоре;  
 $a_d$  — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки.

Формула дает правильный результат только при относительно небольших изменениях зазора, примерно на  $\pm 20\%$ ; более значительные приходится подбирать посредством последовательных приближений.

Однако изменение зазора может быть произведено различными способами. Пусть, например, требуется ослабить чрезмерно сильные добавочные полюса. Если между их сердечниками и ярмом имеется некоторый запас предусмотренных для

этой цели стальных прокладок, нужное ослабление может быть достигнуто удалением соответствующего их числа из-под каждого сердечника; понятно, что при этом зазор между добавочными

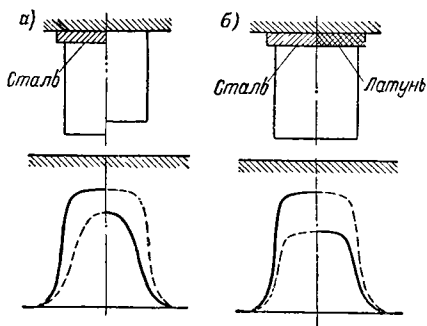


Рис. 2-57. Зависимость формы поля добавочного полюса от зазора: *а* — при удалении магнитных прокладок; *б* — при замене магнитных прокладок немагнитными.

полюсами и якорем возрастет на величину суммы толщин удаленных прокладок.

Но результатом такой операции будет не только ослабление поля добавочных полюсов, но и изменение формы кривой распределения его индукции. Действительно, чем больше зазор, тем сильнее проявляется ослабляющее действие краев башмаков добавочных полюсов, что становится ясно из сравнения двух картин распределения линий поля для малого и большого

зазоров на рис. 2-57, *а*. При таком изменении зазора кривая распределения поля не только понижается, но и претерпевает изменение формы, выражающееся в увеличении ее выпуклости против середины башмака.

В относительно небольших машинах с нетяжелыми условиями коммутации это обстоятельство не играет существенной роли; но в более крупных, особенно в компенсированных машинах, оно приобретает очень важное значение. Выше уже указывалось, что в ответственных случаях приходится опытным путем подбирать наиболее подходящую ширину полюсного башмака; но представленное на рис. 2-57, *а* изменение формы кривой распределения поля, при которой по мере увеличения зазора индукция у краев полюсного башмака уменьшается быстрее, чем против его середины, в известной степени равносильно уменьшению его ширины, что может оказать влияние на ширину области безискровой коммутации.

Чтобы устранить это влияние, следует производить ослабление добавочных полюсов без изменения зазора между ними и якорем, для чего на место каждой удаленной прокладки ставится прокладка из какого-либо немагнитного материала той же толщины. Тогда ослабление поля будет происходить по всей ширине полюсного башмака равномерно, как это представлено на рис. 2-57, *б*: кривая распределения поля сохраняет свою форму, так как все ее ординаты изменяются в одном и том же отношении.

Для возможности такого регулирования правильно построенные машины снабжаются при изготовлении запасом как магнитных, так и немагнитных прокладок под сердечниками добавочных полюсов в таком количестве, которое обеспечивает все возможные понадобятся изменения зазора.

Ввиду того, что рассеяние добавочных полюсов относительно велико, изменение толщины немагнитных прокладок действует значительно сильнее, чем равное ему по величине изменение зазора; в среднем можно считать его действующим вдвое сильнее, что необходимо учитывать при настройке коммутации.

Результат каждого изменения зазора должен быть обязательно проверен повторным проведением опыта дополнительного питания добавочных полюсов.

**Пример.** Двенадцатиполусный генератор мощностью 2470 *квт* при номинальном напряжении 815 *в* и номинальном токе  $I_n = 3030$  *а* снабжен простой петлевой обмоткой с  $2a = 12$  параллельными ветвями, которая состоит из 540 одновитковых секций, следовательно, имеет  $N = 2 \cdot 540 = 1080$  проводников.

Каждый добавочный полюс несет на себе  $w_d = 4$  витка; кроме того, компенсационная обмотка имеет  $w_k = 5$  витков на полюс; обе эти обмотки включены в  $a_d = 2$  параллельные ветви. Ввиду отсутствия последовательной обмотки возбуждения, половина катушек обмотки независимого возбуждения соединена в 6 параллельных ветвей и присоединена в качестве размагничивающей обмотки параллельно к обмотке добавочных полюсов и компенсационной обмотке.

Зазор под добавочными полюсами равен 14 *мм*; кроме того, под каждый добавочный полюс положено 6 *мм* немагнитных прокладок и 8 *мм* стальных прокладок.

При определении области безискровой коммутации установлено, что для номинального тока в якоре безискровая коммутация получается при токах дополнительного питания от +12 до -86 *а*, а цепь размагничивающей обмотки потребляет при этом ток соответственно 57 и 55 *а*.

Требуется определить необходимое изменение зазора для получения наилучшей коммутации.

Прежде всего следует определить величину

$$\theta = \frac{8pa(w_d + w_k)}{N'a_d} = \frac{8 \cdot 6 \cdot 6(4 + 5)}{1080 \cdot 2} = 1,20.$$

При определении среднего тока дополнительного питания следует учесть, что часть тока якора отсасывается от цепи добавочных полюсов и компенсационной обмотки подключенной параллельно к ним искусственно созданной размагничивающей обмоткой; поэтому верхней границей области безискровой коммутации является не +12 *а*, а

$$+12 - 57 = -45 \text{ а},$$

а нижней границей не -86 *а*, а

$$-86 - 55 = -141 \text{ а};$$

отсюда действительная средняя точка области

$$\Delta I = \frac{-45 - 141}{2} = -93 \text{ а}.$$

После этого может быть определено новое значение зазора; при этом должен быть учтен не только фактический зазор между добавочными полюсами и якорем, равный 14 мм, но и наличие немагнитных прокладок общей толщиной 6 мм, действие которых можно считать вдвое более сильным, чем действие фактического зазора:

$$\delta = 14 + 2 \cdot 6 = 26 \text{ мм};$$

тогда

$$\delta' = \frac{\delta}{1 + \frac{\Delta I}{I_n} \cdot \frac{\theta}{\theta - 1}} = \frac{26}{1 - \frac{93}{3030} \cdot \frac{1,2}{1,2 - 1}} = 31,9 \text{ мм}.$$

Таким образом, новый зазор может быть получен удалением из-под каждого добавочного полюса стальных прокладок общей толщиной

$$31,9 - 26 = 5,9 \text{ мм}.$$

Вместо этого можно оставить зазор прежним, заменив часть стальных прокладок немагнитными прокладками общей толщиной примерно вдвое меньшей, т. е. около 3 мм.

После замены прокладок и проверки зазоров следует повторить опыт определения зоны безискровой коммутации.

Необходимо особо остановиться на том случае, когда при полностью удаленных магнитных прокладках добавочные полюса продолжают оставаться чрезмерно сильными, а количество витков на них мало, и удаление хотя бы одного витка на пару полюсов вызовет настолько сильное их ослабление, что оно не может быть устранено введением магнитных прокладок.

Радикальным решением вопроса в этом случае является понижение высоты сердечников добавочных полюсов; но для этого машина должна быть разобрана, с тем, чтобы подвергнуть каждый сердечник соответствующей механической обработке. Если это нежелательно, то можно пойти другим путем — отшунтировать часть тока  $\Delta I_{ш}$  обмотки добавочных полюсов сопротивлением, подключенным параллельно к ней. Если  $r_d$  есть сопротивление обмотки добавочных полюсов при рабочей температуре, то шунтирующее сопротивление должно быть взято из расчета

$$r_{ш} = \frac{I - \Delta I_{ш}}{\Delta I_{ш}} r_d.$$

Однако когда машина работает при быстро изменяющемся токе нагрузки, как это бывает, например, у прокатных двигателей, распределение тока между обмоткой добавочных полюсов и шунтирующим сопротивлением будет нарушаться при каждом быстром изменении тока нагрузки; наличие индуктивности обмотки добавочных полюсов, не проявляющее себя при спокойной нагрузке, заставит шунтирующее сопротивление перегружаться при возрастании тока нагрузки и недогружаться при его убывании.

Между тем именно при резких толчках нагрузки требуется усиление добавочных полюсов, так как нарастание их потока отстает от нарастания тока. Таким образом, применение шунтировки добавочных полюсов сопротивлением для машин, предназначенных для толчкообразной нагрузки, безусловно недопустимо.

По этой причине для таких машин применяются так называемые магнитные шунты, представляющие катушки большой индуктивности с сердечниками, имеющими регулируемый зазор.

Нормально назначением магнитного шунта отнюдь не является ослабление добавочных полюсов при отсутствии других средств к этому. Напротив, при регулировании добавочных полюсов наличие шунтирующей цепи представляет определенные затруднения, так как вынуждает точно учитывать ответвляющийся ток. Последовательно с шунтом включается регулируемое добавочное сопротивление, предназначенное для ограничения ответвляющегося тока при установившемся режиме, так как сопротивление обмотки шунта весьма мало.

Действие шунта состоит в том, что при резких толчках тока нагрузки он становится трудно проходимым, и потому распределение тока между цепью добавочных полюсов и цепью шунта нарушается — ток в цепи шунта еще не успевает измениться, и потому добавочные полюса усиливаются.

Настройка шунта производится обычно на месте установки машины при ее нормальной эксплуатации путем постепенного изменения зазора в сердечнике шунта и наблюдения за искрением машины при резких толчках нагрузки.

## 2-25. Тарирование машины постоянного тока

Выше уже неоднократно упоминалось о применении тарированных двигателей и генераторов постоянного тока.

Тарирование состоит в тщательном определении потерь всех видов, действительно имеющих место при работе машины в различных режимах — при разных напряжениях, скоростях вращения и нагрузках.

Следует оговорить, что эта задача не может быть решена вполне точно обычными методами, применяемыми при испытании электрических машин; результаты тарирования содержат в себе заведомые неточности, отмечаемые далее. Поэтому для получения надежных результатов необходимо, чтобы потери в тарированной машине были малы по сравнению с развиваемой ею мощностью, т. е., иными словами, она должна быть хорошо нагружена; чем выше к. п. д. тарированной машины в режиме испытания, тем точнее его результат.



К сожалению, выполнение этого условия возможно далеко не всегда. В тех случаях, когда не предполагается производить испытание в номинальном режиме испытываемой машины, номинальная мощность тарированного двигателя может быть выбрана соизмеримой с ожидаемыми потерями холостого хода или короткого замыкания испытываемой машины. Но если испытываемая машина должна работать в номинальном режиме, то двигатель должен быть выбран соответствующей мощности, и при определении потерь холостого хода или короткого замыкания испытываемой машины эти последние окажутся одного порядка с потерями в тарированном двигателе, что сильно понижает точность результатов испытания.

Конечно, этот недостаток принципиально может быть устранен применением двух приводных двигателей: одного — большей мощности для привода при номинальной нагрузке (который может и не быть тарированным), и другого — тарированного, с мощностью значительно меньшей, соизмеримой с искомыми потерями. Однако практически это возможно только в редких случаях, так как перестановка двигателей в процессе испытания очень затруднительна.

Если тарированная машина предназначается для сопряжения с испытываемыми машинами с различными данными, ее тарирование должно быть произведено применительно ко всему диапазону этих данных. Если же тарирование производится для испытания только одной определенной машины или нескольких вполне однотипных, оно может быть значительно упрощено. В особенности это относится к тому случаю, когда скорость вращения агрегата во все время испытания должна оставаться неизменной.

Потери холостого хода тарированной машины должны определяться способом, описанным в § 2-11, для всех тех скоростей вращения, при которых предполагается ее применять; а так как при каждой скорости вращения возможно изменение напряжения, а при одном и том же напряжении — изменение э. д. с. в зависимости от нагрузки, то необходимо провести ряд опытов с целью получения сетки потерь холостого хода в возможных пределах изменения скоростей вращения и э. д. с. Чем больше таких опытов, чем гуще эта сетка, тем легче ею пользоваться для всевозможных промежуточных значений этих параметров. Чтобы облегчить пользование тарированной машиной, следует измерять напряжение не на зажимах машины, а на одном лишь якоре, исключая этим падение напряжения в прочих обмотках последовательной цепи — последовательного возбуждения, добавочных полюсов и т. д.; для этого вольтметр присоединяется непосредственно к щеточному аппарату.

Первое затруднение встречается в учете падения напряжения в переходном контакте щеток на коллекторе. Одним из воз-

можных способов обхода этих затруднений является следующий: на двух соседних пальцах щеткодержательной траверзы два щеткодержателя изолируются от прочих, и к их щеткам подключается вольтметр, измеряющий напряжение на якоре; вследствие ничтожности тока, потребляемого вольтметром, падение напряжения в переходном контакте этих щеток очень невелико и им можно пренебречь. Однако, чтобы это давало удовлетворительный результат, необходим очень хороший и устойчивый контакт измерительных щеток с коллектором; в частности, малейшая их вибрация способна сильно исказить результаты измерения. Если применены такие щетки, то э. д. с. в якоре определяется как разность напряжения на якоре и падения напряжения в его обмотке, которое должно учитываться как произведение тока в якоре на сопротивление его обмотки во время опыта; для проверки последнего якорь в процессе тарирования время от времени останавливается и производится измерение сопротивления его обмотки.

Если же измерительные щетки не применяются, то приходится учитывать падение напряжения в переходном слое согласно предписаниям стандарта, принимая его не зависящим от плотности тока в контакте, что понижает точность измерений.

Следующее затруднение при тарировании заключается в непостоянстве механических потерь. Во-первых, как уже указывалось, коэффициент трения щеток зависит от плотности тока в переходном контакте, уменьшаясь с ее повышением; во-вторых, трение в подшипниках зависит не только от скорости вращения, но и от состояния смазки, при прочих равных условиях — от ее температуры. По этой причине тарированная машина должна работать всегда на смазке одной и той же марки; чтобы по возможности исключить влияние температуры, следует производить как тарирование, так и применение тарированной машины только при основательно прогретых подшипниках. Нужно отметить, что установившаяся температура исправных подшипников сравнительно мало зависит от температуры окружающей среды.

Известно, что потери в подшипниках качения гораздо ниже, чем в подшипниках скольжения; но зато в первых они менее устойчивы, завися не только от марки, но и от количества смазки, поддерживать же последнее неизменным крайне трудно.

Чтобы облегчить пользование тарированной машиной, можно заранее построить зависимость потерь в цепи якоря от тока в ней. В том случае, когда применяются измерительные щетки, эти потери сводятся к одним лишь потерям в обмотке якоря. Так как они зависят и от температуры обмотки якоря, то приходится строить ряд таких зависимостей для различных значений температуры. К этим потерям приходится причислить и добавочные потери, которые, согласно предписаниям стандарта,

следует брать для компенсированных машин в размере 0,5%, а для некомпенсированных — в размере 1% от подводимой мощности при номинальном режиме, а для режимов с другими значениями токов пересчитывать пропорционально квадратам последних.

Таким образом, при некоторой температуре обмотки  $\vartheta$  потери в цепи якоря равны:

без применения измерительных щеток

$$P_{\text{я}} = I^2 r_{15} [1 + 0,004 (\vartheta - 15)] + 2\Delta UI + 0,01 U_{\text{н}} \frac{I^2}{I_{\text{н}}};$$

с применением измерительных щеток

$$P_{\text{я}} = I^2 r_{15} [1 + 0,004 (\vartheta - 15)] + 0,01 U_{\text{н}} \frac{I^2}{I_{\text{н}}}.$$

В действительности это не вполне верно, так как добавочные потери зависят не только от тока, но и от скорости вращения, поскольку при переходе с одной скорости на другую изменяется частота в якоре машины; однако сами добавочные потери берутся лишь приближенно.

Протокол тарирования не является документом, действительным на весь срок службы машины; он сохраняет силу только до тех пор, пока не возникнут причины, способные повлиять на величину механических потерь:

- 1) замена смазки ведет к изменению потерь в подшипниках;
- 2) замена щеток, хотя бы щетками той же самой марки, ведет к изменению потерь на их трение;
- 3) срабатывание щеток с течением времени приводит к уменьшению нажима пружин щеткодержателей, что также изменяет потери на трение.

Приступить к тарированию можно только тогда, когда коллектор и щетки имеют вполне устойчивое, приработанное состояние: вся рабочая поверхность коллектора покрыта ровной, глянцево-политурой достаточно темного цвета, а на контактных поверхностях щеток не осталось никаких следов притирания стеклянной бумагой.

Машина, склонная к искрению, имеющая очень узкую область безискровой работы, не пригодна для применения в качестве тарированной, так как состояние ее коллектора и щеток никогда не будет устойчивым.

## 2-26. Особенности испытания сварочных генераторов

Наиболее характерными представителями машин специального назначения среди машин постоянного тока являются генераторы для питания отдельных дуговых сварочных постов, или просто «сварочные генераторы». Их не следует смешивать с ге-

нераторами для группового питания сварочных постов, или многопостовыми сварочными генераторами, являющимися во всех отношениях, кроме номинального напряжения, совершенно нормальными машинами постоянного тока, к которым не предъявляется никаких специфических требований, обусловленных их назначением.

Системы однопостовых сварочных генераторов постоянного тока чрезвычайно разнообразны; но в общем их можно разбить на три группы:

а) генераторы нормальной конструкции, приспособленные для целей сварки путем сочетания двух или более обмоток возбуждения главных полюсов с различными способами их питания; как правило, одна из таких обмоток имеет независимое возбуждение;

б) генераторы специальной конструкции с самовозбуждением; для этих генераторов характерно применение расщепленных главных полюсов с обмотками возбуждения, питаемыми от вспомогательных щеток на коллекторе;

в) генераторы с поперечным полем, у которых щетки, расположенные в нейтральном положении, замкнуты накоротко, а рабочими являются щетки, сдвинутые по отношению к первым на половину полюсного деления; как правило, они имеют только последовательную обмотку возбуждения.

Вне зависимости от системы сварочный генератор должен удовлетворять ряду требований. Эти требования можно подразделить на общие для всех видов электрических машин и специальные требования.

Общими являются требования в отношении соответствия нормам превышений температуры всех частей машины при номинальном режиме работы, электрической и механической прочности, исправности коммутации и удовлетворительной величины коэффициента полезного действия.

К специальным следует отнести требования в отношении регулирования сварочных токов во всем заданном промежутке при номинальном напряжении на дуге, достаточности напряжения холостого хода для удовлетворительного зажигания дуги и соответствия динамических свойств требованиям, предъявляемым сваркой в целях обеспечения устойчивости и спокойного горения дуги. Согласно ГОСТ 304-51, п. 11, динамические свойства считаются удовлетворительными, если при отключении короткого замыкания генератора, отрегулированного на номинальный режим, его напряжение восстановится до величины 25 в не более чем за 0,05 сек. Проверка этого может производиться только снятием осциллограммы тока и напряжения генератора, что и отмечено в п. 38 того же стандарта.

Кроме того, проверка динамических свойств генератора производится сваркой необмазанными электродами определенной

марки во всем диапазоне регулирования, при которой должно быть обеспечено легкое зажигание и поддержание дуги; естественно, что такая проверка носит субъективный характер.

Регулирование сварочного тока согласно п. 12 этого стандарта считается удовлетворительным, если любой заданный ток в пределах от минимального до номинального при номинальном напряжении может быть установлен с точностью до  $\pm 7,5\%$  вне зависимости от того, является регулирование плавным или ступенчатым; при этом в целях обеспечения безопасности сварщика напряжение холостого хода ни при одном из пределов регулирования не должно превосходить 80 в для генераторов с номинальным током до 350 а включительно и 90 в для генераторов с номинальным током свыше 350 а (ГОСТ 304-51, п. 9).

Способ проверки регулирования зависит от того, является оно непрерывным или ступенчатым. В первом случае для него следует производить изменение сопротивления нагрузки достаточно мелкими ступенями и при помощи регулирующего устройства каждый раз подгонять номинальное напряжение на зажимах; при втором надлежит поступать обратным образом — переходя от ступени к ступени, плавно изменять сопротивление нагрузки, подгоняя им напряжение на зажимах. В обоих случаях предпочтительно переходить в процессе проверки от больших нагрузок к меньшим.

Особенностью сварочных генераторов всех систем, кроме генераторов с поперечным полем, является то, что повышение напряжения для испытания междувитковой изоляции обмотки якоря должно производиться по отношению не к номинальному напряжению, а к наибольшему возможному при эксплуатации напряжению холостого хода, которое может быть выше номинального более чем в три раза. Это повышение не может быть осуществлено при рабочем соединении обмоток, поэтому опыт должен производиться при независимом возбуждении.

Что касается генераторов с поперечным полем, то у них наибольшее напряжение имеет место не при холостом ходе, а при токе нагрузки, составляющем обычно 15—25% тока короткого замыкания при данном пределе регулирования (рис. 2-58); оно должно быть определено снятием внешней характеристики при наибольшем пределе регулирования. Само же повышение напряжения холостого хода не может быть произведено обычным путем — увеличением независимого возбуждения главных полюсов, так как станина магнитной системы таких машин не предназначена для проведения сколько-нибудь значительного магнитного потока, изготавливается из относительно тонкого листового материала и быстро насыщается. Поэтому как испытание междувитковой изоляции обмотки якоря, так и снятие характеристики холостого хода в машинах с поперечным полем производится

путем подачи независимого питания в поперечную цепь машины (рис. 2-59).

Испытание на нагревание однопостовых сварочных генераторов, согласно ГОСТ 304-51, п. 39, должно производиться в номинальном режиме, за который, по определению этого стандарта, принимается повторно-кратковременный режим с продолжительностью включения 65% (в стандарте этот режим назван «прерывистым режимом ПР=65%») и с продолжительностью полного цикла 5 мин.

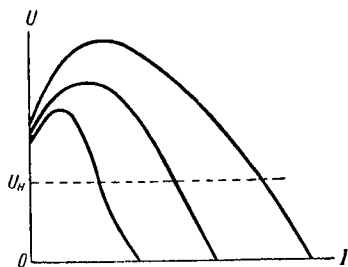


Рис. 2-58. Внешние характеристики сварочного генератора с поперечным полем.

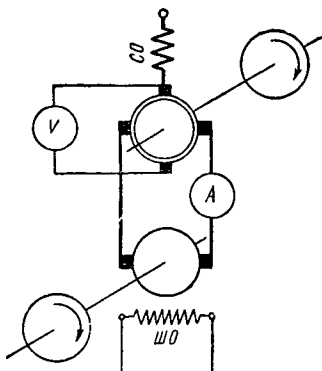


Рис. 2-59. Схема для снятия характеристики холостого хода генератора с поперечным полем.

Своеобразное затруднение встречается при определении к. п. д. генераторов с возбуждением от добавочной щетки в отношении определения падения напряжения и основных потерь в обмотке якоря. По соображениям повышения динамических качеств, ток возбуждения таких генераторов выбирается относительно большим, и потому пренебречь несимметричностью его распределения по обмотке якоря нельзя. Обычно обмотка якоря такого генератора имеет число параллельных ветвей  $2a = 2$ ; так как в обеих ветвях действуют одинаковые э. д. с., то распределение токов при условии, что добавочная щетка стоит ровно посередине между главными, может быть получено из соображений равенства падения напряжения в обеих ветвях,

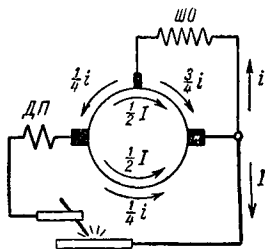


Рис. 2-60. К определению потерь в обмотке якоря сварочного генератора с возбуждением от вспомогательной щетки.

как это представлено на рис. 2-60. В этом случае падение напряжения в обмотке якоря составит:

$$E - U = \left( I + \frac{i}{2} \right) r_{75},$$

где  $r_{75}$  — сопротивление обмотки якоря при  $75^\circ \text{C}$ , а основные потери в ней:

$$P_m = \left( I^2 + Ii + \frac{3i^2}{4} \right) r_{75};$$

последним слагаемым в скобках можно пренебречь из-за его малости; тогда

$$P_m \approx (I^2 + Ii) r_{75}.$$

Среди прочих к сварочным генераторам предъявляется требование возможности параллельной работы двух или более однотипных машин на общий приемник; во всех системах генераторов, имеющих намагничивающую последовательную обмотку возбуждения главных полюсов, как, например, в генераторах с поперечным полем, для этой цели необходимо применять уравнительный провод, и потому доска выводов таких генераторов обычно снабжается дополнительным выводом точки соединения обмотки добавочных полюсов с последовательной обмоткой возбуждения.

Для работы в режиме двигателя однопостовые сварочные генераторы практически непригодны, и потому их взаимная нагрузка не применяется.

## 2-27. Взаимная нагрузка машин постоянного тока

В предыдущем изложении упоминалось о схемах взаимной нагрузки машин постоянного тока. Синхронные машины допускают взаимную нагрузку лишь при помощи сложных специальных приспособлений, а бесколлекторные асинхронные машины вовсе ее не допускают; между тем для взаимной нагрузки машин постоянного тока никаких специальных устройств не требуется.

Под взаимной нагрузкой понимается работа двух электрических машин, соединенных электрически и механически друг с другом так, что одна из них, работающая в режиме генератора, отдает всю вырабатываемую ею электрическую энергию второй машине, работающей в режиме двигателя, а эта последняя, в свою очередь, расходует всю выделяемую ею механическую энергию на вращение первой машины. Приток энергии извне требуется при этом только для покрытия суммы всех

потерь в обеих машинах; этот приток может осуществляться либо электрическим, либо механическим путем, либо, наконец, обоими путями одновременно.

Таким образом, имея в своем распоряжении источник энергии ограниченной мощности, можно осуществить нагрузку машин много большей мощности.

Особенно характерным является тот случай, когда обе взаимно нагружаемые машины во всех отношениях одинаковы; однако это не обязательно — они могут быть только подходящими друг к другу по мощности, напряжению и скорости вращения.

Для машин постоянного тока возможны три основных способа подвода энергии на покрытие потерь в схеме взаимной нагрузки.

**1. Способ параллельного включения источника питания.** Этот способ, известный в литературе также под названием «способа Каппа», состоит в том, что обе машины соединяются друг с другом непосредственно и к ним подводится питание от источника постоянного тока с тем же самым напряжением.

На рис. 2-61 представлена подробная схема такого включения при независимом возбуждении всех входящих в нее машин, которое позволяет производить пуск схемы подъемом возбуждения генератора *ГП* при предварительно поданном возбуждении машины *ИДП*, пускаемой двигателем. После установления заданной скорости вращения подается возбуждение также и второй машине — *НГП*, напряжения обеих машин выравниваются по нулевому вольтметру  $V_0$  и схема может быть замкнута шунтирующим его рубильником. Нагрузка машин друг на друга осуществляется ослаблением возбуждения машины *ИДП*, предназначенной для работы в режиме двигателя, и усилением возбуждения машины *НГП*, которая должна работать в режиме генератора; одновременно следует регулировать возбуждение источника *ГП* для поддержания заданного напряжения.

Если почему-либо применить независимое возбуждение машин нельзя, то схема приобретает вид рис. 2-62. В цепь машины *ИДП* здесь введен дополнительно пусковой реостат, которым и осуществляется ее пуск при полном возбуждении источника *ГП*; все дальнейшие операции производятся по-предыдущему. Разумеется, что работа при самовозбуждении всех машин схемы требует более внимательного наблюдения, чем при их независимом возбуждении. Очень часто применяется промежуточная схема — самовозбуждение машин *ИДП* и *НГП* при независимом возбуждении источника *ГП*.

Если обе машины одинаковы, то неизбежно оказывается, что машина, идущая в режиме двигателя, в данном случае *ИДП*, оказывается нагруженной больше, чем машина, идущая в режиме генератора.



Действительно, при общей величине напряжения на зажимах  $U$  генератор потребляет мощность

$$P_1 = \frac{UI_r}{\eta_r},$$

где  $I_r$  — ток его якоря и  $\eta_r$  — его к. п. д.

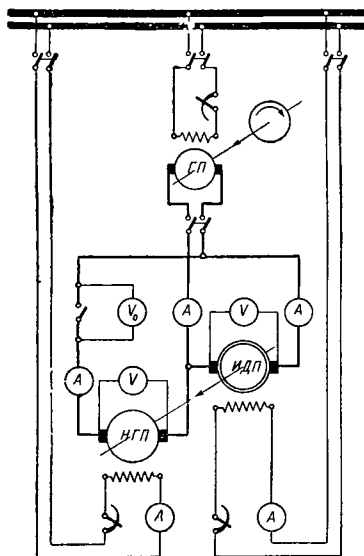


Рис. 2-61. Схема взаимной нагрузки при независимом возбуждении всех машин.

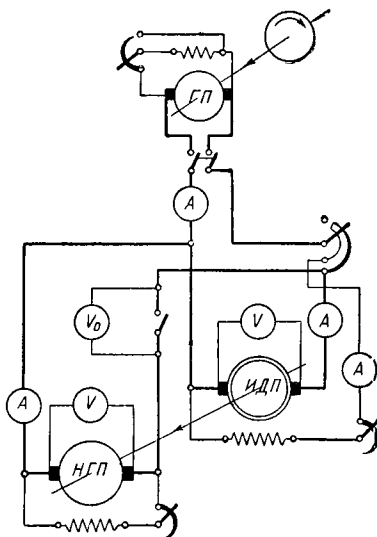


Рис. 2-62. Схема взаимной нагрузки при самовозбуждении всех машин.

Двигатель же отдает мощность

$$P_2 = UI_d \eta_d,$$

где  $I_d$  — ток, потребляемый его якорем, и  $\eta_d$  — его к. п. д.

Это дает:

$$\frac{UI_r}{\eta_r} = UI_d \eta_d,$$

откуда

$$\frac{I_d}{I_r} = \frac{1}{\eta_r \eta_d} > 1.$$

Таким образом, если испытываемая машина является двигателем, то одинаковая с ней машина совершенно свободно может

служить для нее нагрузочным генератором; но если она является генератором, то парная машина может оказаться не в состоянии служить ее приводным двигателем, как это можно ожидать в современных высокоиспользованных машинах.

Для машин малых и средних мощностей положение обычно может быть исправлено посредством усиления вентиляции двигателя, например применением дополнительного продувания через него воздуха от постороннего вентилятора; однако такое решение вопроса не может считаться исчерпывающим, в особенности для более крупных машин, у которых нередко предел повышения тока ставится не только нагреванием, но и условиями коммутации.

Еще одним недостатком схемы с параллельным включением источника питания является то, что номинальное напряжение питающего ее генератора *ГП* должно быть не ниже номинального напряжения питаемой пары. Этот недостаток становится очень ощутительным при испытании крупных машин, как, например, прокатных, имеющих номинальное напряжение обычно от 750 в и выше.

Главное неудобство состоит не в том, что необходимо иметь источник постоянного тока, хотя и относительно небольшой мощности, но с таким достаточно высоким напряжением; это может быть удовлетворено последовательным соединением генераторов более низкого напряжения с заземлением точки соединения для предохранения их изоляции. Гораздо серьезнее обстоит вопрос об изоляции всех соединительных проводников, решение которого в обстановке испытательной станции обычно затруднительно. Кроме того, любая открытая токоведущая часть в схеме представляет при этом источник опасности для обслуживающего персонала, с которой приходится считаться в большей степени, чем во время нормальной эксплуатации машин высокого напряжения, при которой доступ к этим частям прегражден.

Недостатки способа взаимной нагрузки с параллельным включением источника питания устраняются при применении следующих двух способов.

**2. Способ последовательного включения источника питания (способ вольтодобавочного генератора).** Этот способ может быть получен из предыдущего следующим образом: в цепь якоря одной из машин последовательно включается якорь генератора *ВГП* (рис. 2-63), имеющего самостоятельный привод. Этот генератор должен обладать номинальным током не меньшим, чем номинальные токи машин основной пары; но его номинальное напряжение может составлять лишь небольшую долю номинального напряжения последних<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Схема с одновременным применением и параллельного, и последовательного питания известна в литературе под названием «схемы Хетчинсона».

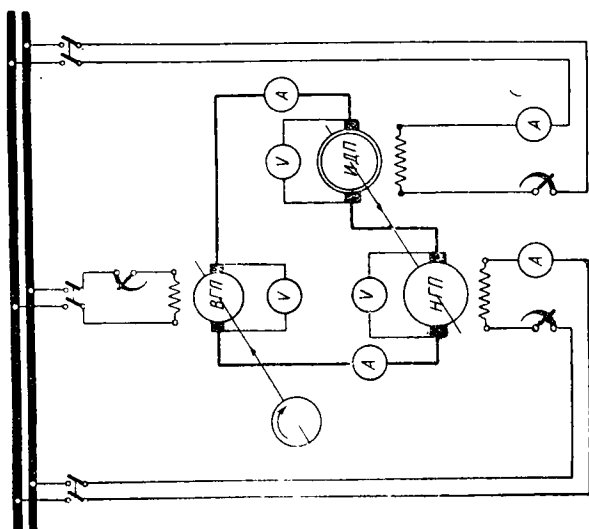
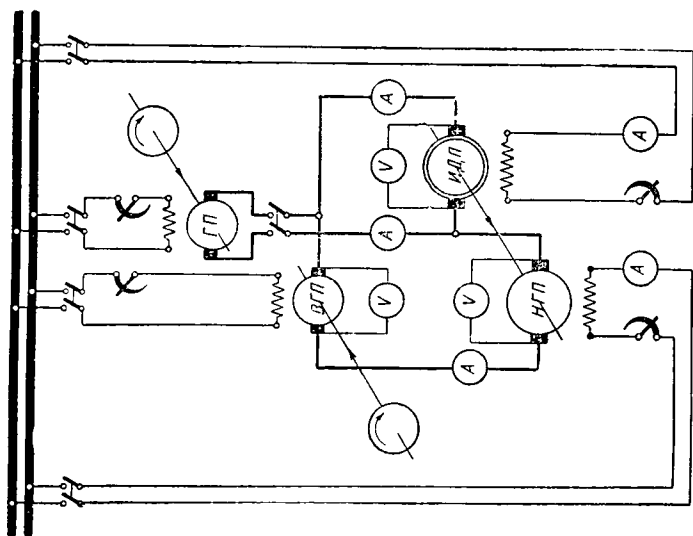


Рис. 2-64. Схема взаимной нагрузки с последовательным питанием.



Если при невозбужденном, но вращающемся генераторе ВГП произвести пуск основной пары машин подъемом напряжения генератора ГП и затем начать возбуждать генератор ВГП, то напряжение последнего будет либо отниматься от напряжения генератора ГП, либо складываться с ним. В результате этого машины основной пары взаимно нагрузятся в том или ином направлении. Одновременным регулированием токов возбуждения всех машин схемы можно добиться того, что токи якорей обеих машин основной пары будут равны друг другу. При этом ток, потребляемый схемой от генератора ГП, станет равным нулю; следовательно, этот генератор может быть вообще отключен — схема будет продолжать работать и без него, приобретая вид, представленный на рис. 2-64.

Такая схема известна под названием «схемы Потье». Для приведения ее в действие достаточно подать обеим машинам основной пары независимое возбуждение, примерно соответствующее номинальному напряжению при холостом ходе с номинальной скоростью вращения, составить замкнутую цепь из всех трех машин, привести вольтдобавочный генератор ВГП во вращение, постепенным подъемом его возбуждения заставить вращаться основную пару и довести ее до номинальной скорости вращения. После этого остается путем повышения возбуждения машины, предназначенной работать генератором, и соответствующим регулированием возбуждения вольтдобавочного генератора установить заданный режим, т. е. добиться соответствующих ему значений скорости вращения, напряжения на зажимах испытываемой машины и тока нагрузки.

Некоторым недостатком данной схемы является то, что заданный режим не всегда легко удастся осуществить, и эта операция требует известного терпения; поэтому такая схема более пригодна для неизменных режимов, как, например, для испытания на нагревание при продолжительной нагрузке, нежели для изменяющихся режимов, как снятие характеристик и т. д.

Номинальное напряжение вольтдобавочного генератора  $U_n$  должно быть не меньше величины, определяемой выражением

$$U_n \geq (1 - \eta_r \eta_d) U_n \approx \frac{\sum P}{I_n},$$

где  $U_n$  — номинальное напряжение испытываемой машины,  $I_n$  — ее номинальный ток и  $\sum P$  — полные потери в схеме.

Значения к. п. д. генераторного режима  $\eta_r$  и двигательного режима  $\eta_d$  могут быть подсчитаны на основании расчетных или опытных данных о потерях в машинах пары; при этом потери на возбуждение не учитываются, поскольку машины имеют независимое возбуждение.

**Пример.** Требуется определить наименьшее номинальное напряжение вольтодобавочного генератора, при помощи которого можно было бы произвести взаимную нагрузку якорей двухъякорного компенсированного гребного двигателя мощностью  $P_2 = 3500$  л. с. на якорь, с номинальным током  $I_H = 2750$  а и номинальным напряжением  $U_H = 1000$  в. Для соединения вольтодобавочного генератора с испытываемой машиной в каждый конец проложены по четыре медных проводника с резиновой изоляцией сечением  $q = 240$  мм<sup>2</sup>, общей длиной около  $l = 60$  м.

Измеренные потери в стали составляют в среднем на один якорь при номинальном напряжении  $P_{ст} = 23,5$  кВт; общие механические потери обоих якорей равны  $2P_T = 21,3$  кВт; сопротивления обмоток якорей, измеренные в холодном состоянии и приведенные к 15° С, равны  $r_я = 0,0076$  ом, сопротивления последовательно включенных обмоток магнитной системы  $r_n = 0,0046$  ом. Щетки — электрографитированные, марки ЭГ-14.

Полагая, что обмотки при испытании будут нагреты до температуры  $\vartheta = 90^\circ$  С, можно оценить потери в обмотках всей цепи величиной

$$2P_M = 2I_H^2 (r_я + r_n) [1 + \alpha (\vartheta - 15)] = \\ = 2 \cdot 2750^2 (0,0076 + 0,0046) [1 + 0,004 (90 - 15)] = 240\,000 \text{ вт.}$$

Потери в переходном контакте щеток должны быть приняты согласно предписаниям норм как произведение числа последовательно включенных контактов на ток и на падение напряжения в одном переходном контакте, условно принимаемое для щеток, не содержащих металла, равным  $\Delta U = 1$  в:

$$2P_{щ} = 4I_H \Delta U = 4 \cdot 2750 \cdot 1 = 11\,000 \text{ вт.}$$

Потери в соединительных проводниках

$$P_{пр} = I_H^2 \frac{\rho l}{q} = 2750^2 \cdot \frac{0,0175 \cdot 60}{4 \cdot 240} = 8275 \text{ вт.}$$

Потери в стали якоря двигателя при нагрузке меньше, чем при холостом ходе, так как э. д. с. якоря равна разности между напряжением на зажимах и суммой всех падений напряжения в цепи якоря:

$$E_d = U_H - I_H (r_я + r_n) [1 + \alpha (\vartheta - 15)] - 2\Delta U = \\ = 1000 - 2750 (0,0076 + 0,0046) [1 + 0,004 (90 - 15)] - 2 \cdot 1 = 954,4 \text{ в;}$$

$$P'_{ст} = \frac{E_d^2}{U_H^2} P_{ст} = \frac{954,4^2}{1000^2} \cdot 23\,500 = 21\,400 \text{ вт.}$$

Труднее определить потери в стали якоря в генераторном режиме, так как величина напряжения на его зажимах еще неизвестна; поэтому предварительно можно принять их равными потерям при холостом ходе.

Остается еще учесть добавочные потери, которые для компенсированных машин оцениваются приблизительно как 0,5% электрической мощности:

$$P_d = 0,005 U_H I_H = 0,005 \cdot 1000 \cdot 2750 = 13\,750 \text{ вт.}$$

Тогда сумма всех потерь в схеме будет равна

$$\sum P = 2P_M + 2P_{щ} + P_{пр} + 2P_T + P'_{ст} + P_{ст} + 2P_d = \\ = 240\,000 + 11\,000 + 8275 + 21\,300 + 21\,400 + 23\,500 + 2 \cdot 13\,750 \approx 353\,000 \text{ вт.}$$

Отсюда номинальное напряжение вольтодобавочного генератора должно быть не менее

$$\frac{\sum P}{I_H} = \frac{353\,000}{2750} = 128 \text{ в.}$$

Как видно из приведенного примера, номинальное напряжение вольтодобавочного генератора может быть настолько низким, что его изоляция будет совершенно не соответствовать работе при номинальном напряжении испытываемых машин. Для того чтобы обезопасить ее, можно применить заземление одного из его зажимов, что позволяет производить сборку почти всей схемы проводниками с очень слабой изоляцией; только одна перемычка между машинами основной пары со стороны, противоположной вольтодобавочному генератору, должна иметь изоляцию, достаточную для полного напряжения. Но эта перемычка

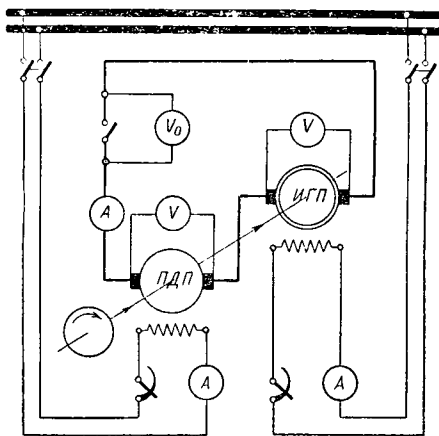


Рис. 2-65. Схема взаимной нагрузки с механическим покрытием потерь.

обычно может быть выполнена предельно коротким проводником или шиной, недоступными для прикосновения и не соприкасающимися с корпусами машин или другими заземленными частями.

**3. Способ механического покрытия потерь.** Этот способ, известный в литературе под названием «способа Гопкинсона», заключается в том, что на общем валу с основной парой сопрягается еще какой-нибудь вспомогательный двигатель, мощность которого не меньше, чем сумма всех потерь в этой паре, а скорость вращения та же самая (рис. 2-65).

Схема приводится в действие разворачиванием агрегата (либо вспомогательным двигателем, либо одной из машин основной пары), возбуждением обеих машин пары до номинального (или иного заданного) напряжения и замыканием их друг

на друга после проверки равенства напряжений по способу нулевого вольтметра; нагрузка создается затем регулированием возбуждения обеих машин.

Этот способ особенно пригоден для испытания генераторов наиболее крупных мощностей, которые большей частью выпускаются в составе многомашинных агрегатов с синхронными или асинхронными двигателями; последние и выполняют при этом роль вспомогательных, что освобождает от заботы о поддержании неизменной скорости вращения агрегата. Он пригоден и для испытания крупнейших двигателей постоянного тока, выпускаемых в многоякорном исполнении, когда число якорей больше двух. При этом следует учесть, что якорь, идущий в режиме генератора, нагружен по напряжению больше, чем якорь, идущий в режиме двигателя, в силу чего обмотка возбуждения его магнитной системы может перегреваться из-за повышения тока возбуждения сверх номинального. Если такая опасность существует, следует производить испытание в режиме генератора, подобранном так, чтобы э. д. с. соответствовала режиму двигателя.

Свойства трех перечисленных способов взаимной нагрузки сопоставлены в табл. 2-7.

Таблица 2-7

| Способ                        | Машина в режиме генератора                   | Машина в режиме двигателя                    |
|-------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Параллельного питания         | Номинальная нагрузка<br>Недогрузка по току   | Перегрузка по току<br>Номинальная нагрузка   |
| Последовательного питания     | Номинальная нагрузка<br>Недогрузка по потоку | Перегрузка по потоку<br>Номинальная нагрузка |
| Механического покрытия потерь | Номинальная нагрузка<br>Перегрузка по потоку | Недогрузка по потоку<br>Номинальная нагрузка |

Необходимо упомянуть еще о сочетании последних двух способов — о способе одновременного применения последовательного питания для покрытия потерь в меди и механического покрытия потерь в стали и на трение, который часто встречается в литературе под названием «способа Блонделя», однако вряд ли он имеет серьезное значение для практики промышленных испытаний.

Попутно следует отметить, что первоначально все многочисленные способы взаимной нагрузки предназначались их авторами специально для непосредственного определения к. п. д. испытываемых машин, и разнообразие их объясняется стремлением

поставить обе машины в такие условия, при которых потери по возможности лучше соответствовали бы условиям номинального режима.

В настоящее время можно считать это назначение взаимной нагрузки совершенно утраченным; для сколько-нибудь крупных машин более точные результаты дает способ измерения отдельных потерь, а для мелких — непосредственное определение к. п. д. может быть проведено менее сложными способами, как это рассмотрено в § 2-17.

## **2-28. Устойчивость машин постоянного тока при совместной работе**

Все применяемые обычно схемы возвратной работы и взаимной нагрузки, составленные из нормальных машин, обязательно содержат в себе по крайней мере один участок, на котором передача энергии производится постоянным током. От устойчивости этого участка зависит работа всей схемы.

Первым мероприятием по повышению устойчивости является независимое возбуждение всех машин от постороннего источника (или источников) с напряжением, не зависящим от процессов, происходящих в схеме. Установление любого заданного режима происходит при независимом возбуждении несравненно быстрее и точнее и даже в наиболее сложных схемах требует гораздо меньше исправлений для последовательного приближения к заданным параметрам работы, чем при самовозбуждении. Поэтому самовозбуждение генераторов и возбуждение двигателей от цепи якоря в практике испытательных станций, как правило, не применяется (за исключением тех случаев, когда требуется выяснение свойств машин, связанных именно с их самовозбуждением).

Однако этого мало; устойчивость совместной работы машин постоянного тока тесно связана с системой их возбуждения.

Работа участка передачи энергии постоянным током может считаться устойчивой в том случае, когда она безотказно подчиняется управлению при помощи изменения токов возбуждения генератора и двигателя в пределах от холостого хода до наибольшей применяемой нагрузки и когда всякое нарушение установленного режима, вызванное случайной причиной, автоматически устраняется, как только эта причина перестанет действовать.

Таким образом, понятие устойчивой работы совершенно исключает возможность самопроизвольной нагрузки или разгрузки, не подчиняющейся управлению токами возбуждения.

Устойчивость работы тем больше, чем более круто падающими являются внешняя характеристика генератора и рабочая характеристика двигателя. Такими характеристиками обладают



машины со смешанным возбуждением: генераторы с встречным включением последовательной обмотки (на размагничивание основного поля) и двигатели с согласным включением последовательной обмотки (на подмагничивание основного поля). Чем относительно сильнее включенные таким образом последовательные обмотки, тем устойчивее работа передачи.

Однако чрезмерно крутое спадание характеристик приводит к другому неудобству: напряжение системы становится трудно поддерживать неизменным, так как всякое изменение нагрузки отражается на нем очень заметным образом. Кроме того, сильное размагничивание генератора его последовательной обмоткой вызывает необходимость перегрузки основной обмотки главных полюсов повышенным током возбуждения. Поэтому отнюдь не требуется, чтобы последовательные обмотки были слишком сильными; вполне достаточно, если при всех напряжениях, возможных в процессе испытаний, характеристики имеют ясно выраженный падающий характер на всем своем протяжении.

Сказанное относится в одинаковой степени как к машинам постоянного тока, составляющим оборудование испытательной станции, так и к испытываемым машинам. Но если первые могут быть снабжены постоянными последовательными обмотками, то далеко не каждая испытываемая машина снабжена последовательной обмоткой; кроме того, если последняя и имеется, то отнюдь не всегда предназначена для включения, благоприятного в смысле повышения устойчивости. Напротив, в большем числе случаев последовательная обмотка предназначена для согласного включения в режиме генератора; и только у двигателей она сравнительно редко предназначена для встречного включения, а крупные двигатели большей частью вовсе не имеют последовательной обмотки.

В крупных агрегатах, предназначенных для питания отдельных двигателей постоянного тока, например прокатных, и состоящих из двигателя переменного тока и двух генераторов постоянного тока, нередко применяется перекрестное включение последовательных обмоток. Принцип его состоит в том, что в цепь якоря каждого из генераторов включена намагничивающая последовательная обмотка другого генератора. Это позволяет сохранить все преимущества согласного включения для получения нужной внешней характеристики и в то же время избавляет от применения уравнительного провода, необходимого для обеспечения правильного распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами со смешанным согласным возбуждением.

Если в силу каких-нибудь причин один из генераторов примет на себя большую нагрузку, его возросший ток подмагнитит другой генератор и заставит последний принять избыток нагрузки на себя (рис. 2-66, а). Если же производить взаимную на-

грузку таких генераторов, то в машине, переведенной в режим двигателя, ток изменит направление и, следовательно, будет размагничивать машину, идущую в режиме генератора, чем и обеспечится устойчивость нагрузки (рис. 2-66, б). Практически в крупных машинах обычно не требуется, чтобы последовательные обмотки были очень сильны; поэтому нет надобности проводить

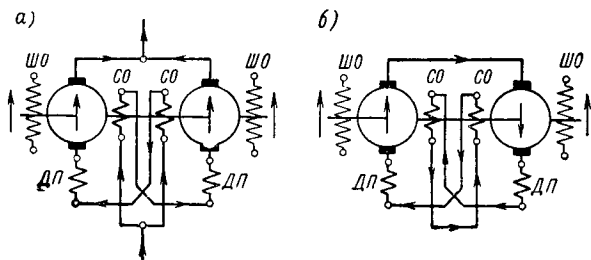


Рис. 2-66. Перекрестное включение последовательных обмоток: а — при параллельной работе; б — при взаимной нагрузке.

через них весь ток парной машины, а вполне достаточно ответить только некоторую его часть, воспользовавшись каким-нибудь падением напряжения в цепи якоря парной машины, например на зажимах коммутирующих обмоток (т. е. добавочных полюсов и компенсационной). Схема при этом приобретает вид рис. 2-67 и носит название «дифференциального включения».

Если испытываемая машина не имеет последовательной обмотки, то можно прибегнуть к наложению временной последовательной обмотки гибким проводником с достаточной изоляцией так, как это подробно рассмотрено в § 2-13.

Если же конструкция машины не позволяет этого сделать, или это противоречит программе испытаний, то можно переложить задачу поддержания устойчивости работы на ту вспомогательную машину, которая электрически соединена с испытываемой, т. е. на питающий генератор в случае испытания двигателя и на нагрузочный двигатель в случае испытания генератора.

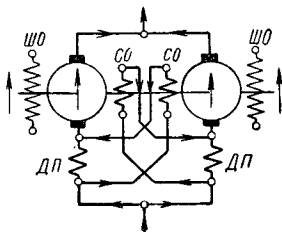


Рис. 2-67. Дифференциальное включение.

Последовательная обмотка является не единственным средством для достижения устойчивости работы; падающие характеристики — внешнюю в режиме генератора и рабочую в режиме

двигателя — можно получить и путем смещения щеток из нейтрального положения по направлению вращения; в случае генератора это создает размагничивающую продольную составляющую поля реакции якоря (рис. 2-68, а), а в случае двигателя — намагничивающую (рис. 2-68, б).

Естественно, что при этом следует обращать внимание на коммутацию смещенных щеток, искрение которых во избежание повреждения коллектора не должно превосходить степени 1,5 по шкале ГОСТ 183-55.

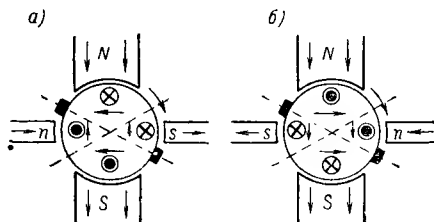


Рис. 2-68. Продольная составляющая реакции якоря при смещении щеток по направлению вращения: а — в генераторе; б — в двигателе.

При применении схемы взаимной нагрузки с последовательным питанием (§ 2-27) устойчивость работы машин основной пары, не имеющих последовательных обмоток, может быть обеспечена применением размагничивающей последовательной обмотки в вольтодобавочном генераторе; однако поскольку номинальное напряжение последнего в несколько раз меньше номинального напряжения машин основной пары, эта размагничивающая обмотка должна быть достаточно сильной, так как иначе ее действие будет слишком незначительным по отношению к напряжению системы.

Отметим в заключение, что устойчивость работы участка передачи энергии постоянным током увеличивается, если между генератором и питаемым им двигателем включено сопротивление, создающее заметное падение напряжения, например бухта кабеля или длинный шинопровод.

## ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

### ИСПЫТАНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН

#### 3-1. Программы типовых и контрольных испытаний

Для всех видов синхронных машин — генераторов, двигателей и компенсаторов — ГОСТ 183-55, п. 34, устанавливает следующую обязательную программу типовых испытаний:

- \* а) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;

- \* б) измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;

- \* в) испытание ротора при повышенной скорости вращения. Для гидрогенераторов, имеющих сегментный обод, это испытание необязательно, оно может быть произведено по желанию заказчика на месте установки;

- \* г) испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;

- \* д) испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток переменного тока;

- \* е) определение характеристики холостого хода;

- \* ж) определение характеристики установившегося короткого замыкания;

- з) измерение тока возбуждения в режиме ненагруженного перевозбужденного двигателя при номинальном напряжении и номинальном токе якоря;

- и) определение номинального тока возбуждения и номинального изменения напряжения;

- к) испытание на кратковременную перегрузку по току;

- л) определение потерь в стали, механических потерь и потерь короткого замыкания;

- м) испытание на нагревание (непосредственной нагрузкой или косвенным методом);

- н) испытание механической прочности при ударном токе короткого замыкания. Для синхронных машин каждой серии данного завода это испытание производят для машины с наибольшим полюсным делением;

о) определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения;

п) опытное определение реактивных сопротивлений и постоянных времени обмоток (для машин мощностью свыше 100 *кв*а);

р) испытание охлаждающей системы машин, работающих с замкнутым циклом вентиляции. Это испытание производят по программе завода, изготовившего охлаждательную систему;

\* с) испытание возбудителя. Это испытание производят по программе, указанной в п. 33 настоящего стандарта, за исключением подпункта «з»;

т) определение скорости нарастания напряжения возбудителя синхронного генератора и синхронного компенсатора (для машин мощностью свыше 3000 *кв*а). Для машин мощностью 3000 *кв*а и менее это испытание производят при наличии указаний в стандартах или в технических условиях на эти машины;

у) определение кратностей пускового тока (для синхронных двигателей и синхронных компенсаторов, не имеющих пусковых двигателей) и кратности пускового момента (для синхронных двигателей). При отсутствии необходимого источника питания это испытание допускается производить при пониженном напряжении.

Пункты этой программы, отмеченные звездочкой, составляют программу контрольных испытаний.

В синхронных машинах менее, чем в каких-либо иных, существует различие между работой в режимах генератора и двигателя; поэтому и программа, кроме п. «о» и последних двух пунктов, не делает между ними никакого различия.

Программа составлена применительно к машинам не только трехфазного тока; она может быть распространена и на машины со всяким иным числом фаз, в частности на машины однофазного тока. Хотя ГОСТ 183-55 распространяется только на машины переменного тока с номинальной частотой 50 *гц*, но программа приложима к машинам со всеми возможными значениями номинальной частоты, если они не сопровождаются особыми техническими условиями.

Установившейся конструкцией синхронной машины является так называемое «прямое» исполнение, при котором индуктор является вращающейся частью (ротором), а якорь — неподвижной (статором).

Однако при небольших мощностях широко применяется и «обращенное» исполнение, когда, наподобие машины постоянного тока, индуктор является неподвижной частью, а якорь — вращающейся. Так же выглядят изредка встречающиеся генераторы двойного тока, являющиеся одновременно генераторами и постоянного, и переменного тока. Программа не делает различия между прямым и обращенным исполнениями, но прове-

дение некоторых испытаний приобретает в зависимости от исполнения свои особенности.

Первые четыре пункта программы являются испытаниями, общими для всех видов электрических машин; специфическую особенность представляет только необычайно высокий предел повышения скорости вращения при испытании механической прочности роторов гидрогенераторов.

Порядок чередования большинства испытаний не определяется их нумерацией по программе и может быть видоизменен сообразно с требованиями удобства и экономии времени; только в отношении испытания электрической прочности как изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками, так и междувитковой изоляции должно учитываться предписание ГОСТ 183-55, п. 57, согласно которому этому испытанию должны предшествовать: испытание на нагревание (если оно производится), проверка сопротивления изоляции обмоток, испытание при повышенной скорости вращения и испытание при кратковременной перегрузке по току.

За исключением последнего пункта программы — определения пусковых характеристик двигателя — все остальные испытания при вращающейся машине могут быть произведены в режиме генератора.

Стандарты на отдельные виды синхронных машин не содержат каких-либо указаний в отношении программ испытаний этих машин на заводе-поставщике; но в каждом из них содержится программа приемо-сдаточных испытаний по окончании монтажа на месте установки: для турбогенераторов — ГОСТ 533-51, пп. 35 и 36; для гидрогенераторов — ГОСТ 5616-50, п. 33; для синхронных компенсаторов — ГОСТ 609-54, п. 30.

### **3-2. Испытание междувитковой изоляции обмотки якоря**

Согласно требованию ГОСТ 183-55, п. 28, испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток переменного тока всех синхронных машин, кроме гидрогенераторов, производится повышением напряжения на 30% сверх номинального; однако если при номинальном токе возбуждения напряжение холостого хода превышает номинальное напряжение более чем на 30%, то испытание должно производиться при напряжении холостого хода, соответствующем номинальному току возбуждения.

Для гидрогенераторов испытание междувитковой изоляции должно производиться повышением напряжения на 50% сверх номинального, поскольку при сбросе нагрузки с гидравлических турбин возможно быстрое повышение скорости вращения (а вместе с ней и напряжения), более значительное, чем у первичных двигателей других систем.

Столь значительное повышение напряжения не может быть достигнуто одним лишь увеличением тока возбуждения, который при 130% номинального напряжения холостого хода имеет один порядок с номинальным током возбуждения. Поэтому стандарт разрешает производить одновременное повышение частоты, однако не более чем на 15% сверх номинальной.

Следует отметить, что это разрешение распространяется и на те машины, для которых испытание междувитковой изоляции производится повышением напряжения на 30%, но практически пользоваться им почти не приходится, в особенности когда привод испытываемой машины осуществляется маломощным двигателем, например возбудителем, потому что потери холостого хода при повышенной скорости вращения больше, чем при номинальной.

Повышение напряжения пужно производить плавно, будучи в любой момент готовым снять возбуждение, если произойдет замыкание витков. Напряжение, поднятое до предписанного значения, выдерживается в течение 5 мин, после чего так же плавно снижается.

Если испытание производится без повышения частоты, то отсчеты по всем примененным измерительным приборам во время испытания могут быть приняты в качестве первой точки характеристики холостого хода; если же испытание производится с повышением частоты, то сначала нужно снизить частоту до номинальной, не изменяя тока возбуждения.

### 3-3. Опыт холостого хода в режиме генератора

К опытам снятия характеристики холостого хода и определения потерь холостого хода в синхронных машинах может быть приложено все сказанное выше об этих опытах для машин постоянного тока, кроме, конечно, упомянутых там специальных случаев, характерных только для машин постоянного тока особого выполнения. Здесь остается лишь добавить некоторые подробности, характерные только для синхронных машин.

При испытании многофазных машин желательно производить измерение как линейного, так и фазового напряжения, с целью проверки сохранения соотношения между ними, равного при трехфазной системе  $\sqrt{3} = 1,732...$

Всякие отклонения от этого соотношения в меньшую сторону, если только они не могут быть объяснены погрешностями приборов, свидетельствуют о засоренности фазового напряжения высшими гармоническими, отсутствующими в линейном; в трехфазной системе это будут гармонические порядков, кратных трем, в первую очередь третья гармоническая. Наличие их в кривой фазового напряжения определяется их содержанием в кривой распределения индукции по окружности машины и ве-

личинами обмоточных коэффициентов данной обмотки для гармонических этих порядков; но сопряжение фаз в звезду, сохраняя неизменным соотношение амплитуд гармонических с порядками, не кратными трем, полностью отфильтровывает все гармонические с порядками, кратными трем, чем и объясняется различие в составе кривых фазового и линейного напряжений.

Если машина имеет высокое напряжение и измерение его производится посредством трансформатора напряжения, то следует избегать изменения предела шкалы вольтметра во время испытания, так как от этого изменяется нагрузка трансформатора; поэтому нужно стремиться подобрать пределы трансформатора напряжения и вольтметра так, чтобы они позволяли произвести снятие всех отсчетов без изменения пределов, кроме только отсчета при отключенном возбуждении, который может быть произведен даже совершенно другим прибором — погрешность этого измерения играет ничтожную роль.

Синхронные генераторы со специальными обмотками постоянного тока для питания индуктора, которые при обращении исполнения машины располагаются на роторе и в этом случае ничем не отличаются от обычных обмоток якорей машин постоянного тока, а при прямом исполнении закладываются в пазы статора и снабжаются теми или иными приспособлениями для выпрямления тока, играющими роль коллектора, — могут быть уподоблены самовозбуждающимся генераторам постоянного тока с параллельным возбуждением. Поэтому для них можно различать характеристику холостого хода при независимом возбуждении — от совершенно постороннего источника — и при возбуждении от собственной обмотки постоянного тока; впрочем, так как реакция обмотки постоянного тока при щетках в нейтральном положении является чисто поперечной, влияние ее невелико, и практически заметной разницы между этими двумя способами снятия характеристики холостого хода даже в очень небольших машинах не наблюдается.

Если снятие характеристики холостого хода сопровождается определением потерь холостого хода, то следует пользоваться возбуждением от постороннего источника, чтобы не осложнять определение потерь холостого хода учетом потерь, связанных с возбуждением.

При наличии собственного возбудителя следует, исходя из этих соображений, предпочесть возбуждение не от него, а от постороннего источника.

Как и в самовозбуждающихся генераторах постоянного тока с параллельным возбуждением, снятие характеристики холостого хода при возбуждении от собственной обмотки постоянного тока имеет самостоятельное значение только в отношении определения предела самовозбуждения. Это же относится и к



тем генераторам, которые возбуждаются от основной обмотки якоря через сухие, механические или вакуумные выпрямители.

При снятии характеристики холостого хода машин, предназначенных для работы с сопряжением фаз в треугольник, весьма желательно производить измерение тока, циркулирующего по замкнутому треугольнику, для чего необходимо в одном месте ввести в него трансформатор тока, а если это невозможно, то хотя бы измерительные клещи. При вполне симметричной машине ток внутри треугольника имеет трехкратную частоту; но если в машине имеется достаточно ясно выраженная несимметричность, то этот ток имеет примесь основной частоты, что устанавливается осциллографированием формы его кривой.

Отклонение частоты от номинального значения при снятии характеристики холостого хода, даже очень значительное, не играет роли, так как измеренное напряжение может быть приведено к номинальной частоте пропорциональным пересчетом; сложнее обстоит дело с потерями холостого хода, так как механические потери при небольших отклонениях частоты от номинальной (примерно в пределах  $\pm 5\%$ ) можно считать пропорциональными частоте в степени  $3/2$ , а потери в стали при тех же условиях — пропорциональными квадрату частоты. Поэтому отклонения частоты от номинальной при измерении потерь если и могут быть допущены, то лишь в незначительных размерах. Более подробно этот вопрос рассмотрен в § 4-6 для опыта холостого хода асинхронного двигателя, для которого он имеет более существенное значение, поскольку зачастую при нем нет возможности регулирования частоты, что при испытании синхронных машин встречается сравнительно редко.

### 3-4. Проверка симметричности напряжений обмотки якоря

Хотя операция проверки симметричности напряжений обмотки якоря непосредственно и не упоминается в программе, но проведение ее строго обязательно для всех машин многофазного тока, так как ею проверяется правильность соединений обмотки; в получивших повсеместное применение двухслойных обмотках, особенно при дробных числах пазов на полюс и фазу, легко возможны ошибки в соединениях, в результате которых несколько секций обмотки попадают не в свою фазу.

При доступной нулевой точке (нейтрали) обмотки якоря проверка состоит в измерении всех линейных и всех фазовых напряжений при неизменных скорости вращения и токе возбуждения; наблюдаемое различие измеренных величин не должно превосходить суммы погрешностей приборов, применяемых при проверке: вольтметра (с трансформатором напряжения или без него), амперметра тока возбуждения и частотомера или тахо-

метра. Сумма этих погрешностей известна не всегда; можно принять предельное допустимое расхождение между наибольшим и наименьшим измеренными значениями в 1% от их средней величины.

Если нулевая точка обмотки якоря недоступна, то приходится довольствоваться измерением только междупазовых (линейных) напряжений.

В том случае, когда фазы обмотки якоря сопряжены в треугольник (что, впрочем, встречается редко), напряжение между каждыми двумя его вершинами является результатом действия э. д. с. в двух параллельных ветвях, одну из которых составляет одна фаза, а другую — две остальные. Поэтому всякое отступление от симметричности способно вызвать уравнивающий ток внутри треугольника, результатом которого будут являться падения напряжения, выравнивающие эту несимметричность и затрудняющие ее определение; однако задача решается, если есть возможность разорвать треугольник в одной из его вершин.

В небольших машинах обращенного исполнения, а также в одноякорных преобразователях встречаются заведомо несимметричные обмотки, например, когда общее число пазов на якоре не кратно числу фаз.

Измерение, произведенное в каждой фазе своим прибором, зависит от случайного сочетания погрешностей приборов. Поэтому более целесообразно пользоваться одним и тем же прибором, переключая его при помощи вольтметрового переключателя, причем при номинальных напряжениях до 525 в переключатель может быть присоединен непосредственно к выводам, при высоких же напряжениях необходимо применение трансформаторов напряжения; тогда вольтметровый переключатель присоединяется к их вторичным обмоткам. При отсутствии нулевой точки можно создать ее искусственно из трех однофазных трансформаторов напряжения; однако всякая несимметричность нагрузок вторичных обмоток может исказить звезду вторичных напряжений трансформаторов напряжения, вследствие чего ее нулевая точка сместится.

При отсутствии достаточного количества трансформаторов напряжения приходится пользоваться одним, включая его поочередно под то или иное напряжение, для чего необходимо каждый раз снимать возбуждение с машины; это затягивает опыт, понижает его точность и потому вообще нежелательно. Однако нет принципиальных возражений против проведения проверки симметричности напряжений без возбуждения на одном лишь напряжении от остаточного намагничивания, которое даже в наиболее крупных машинах не выходит из пределов низких напряжений.

Заведомо несимметричными являются обмотки генераторов индукторного типа повышенной и высокой частоты с обмоткой

возбуждения на статоре. В таких машинах, несмотря на практическое равенство всех фазовых напряжений, линейные напряжения могут быть неодинаковыми вследствие неравенства сдвигов между фазами; для них обязательна проверка симметричности и фазовых, и линейных напряжений.

Одновременно с проверкой симметричности напряжений надлежит определить порядок следования фаз и напести обозначения выводов обмотки якоря в соответствии с указаниями ГОСТ 183-55, пп. 61 и 62. При вращении машины в указанном для нее направлении порядок чередования обозначений выводов должен соответствовать порядку следования фаз.

Обозначения выводов для синхронных машин трехфазного тока даны в табл. 3-1.

Таблица 3-1

| № п/п. | Наименование и схема соединений обмоток                | Число выводов | Название выводов | Обозначения выводов |       |
|--------|--------------------------------------------------------|---------------|------------------|---------------------|-------|
|        |                                                        |               |                  | начало              | конец |
| 1      | А. Обмотки статора (якоря)<br>Открытая схема . . . . . | 6             | Первая фаза      | C1                  | C4    |
|        |                                                        |               | Вторая "         | C2                  | C5    |
|        |                                                        |               | Третья "         | C3                  | C6    |
|        |                                                        |               |                  |                     |       |
| 2      | Соединение звездой . . .                               | 3 или 4       | Первая фаза      | C1                  |       |
|        |                                                        |               | Вторая "         | C2                  |       |
|        |                                                        |               | Третья "         | C3                  |       |
|        |                                                        |               | Нулевая точка    | 0                   |       |
| 3      | Соединение треугольником . . . . .                     | 3             | Первый зажим     | C1                  |       |
|        |                                                        |               | Второй "         | C2                  |       |
|        |                                                        |               | Третий "         | C3                  |       |
| 4      | Б. Обмотки возбуждения (индукторов) синхронных машин   | 2             | —                | И1                  | И2    |

Выводы машин, имеющих составные обмотки (например двойные обмотки крупных турбогенераторов) и секционированные обмотки (например генераторов для испытательных станций) с переключениями на различные напряжения, должны обозначаться теми же буквами, что и простые обмотки, но с дополнительными цифрами впереди букв, например: 1C1, 1C4, 2C1, 2C4 и т. д.

Обмотки якорей синхронных машин однофазного тока согласно п. 65 должны иметь обозначения выводов C1 (начало) и C2 (конец).

### 3-5. Опыт холостого хода в режиме двигателя

Если при каком-либо определенном напряжении, например номинальном, подрегулировать возбуждение синхронного двигателя так, чтобы ток, потребляемый им от источника, был наименьшим, следовательно, чтобы коэффициент мощности был равен единице, то установленное таким образом значение тока возбуждения практически не будет отличаться от соответствующего этому напряжению по характеристике холостого хода, снятой в режиме генератора. Это обстоятельство позволяет производить снятие характеристики холостого хода в режиме двигателя, для чего нужно иметь источник переменного тока с широко регулируемым напряжением.

Опыт может быть начат с испытания междувитковой изоляции обмотки якоря при подведенном к машине напряжении, превышающем на 30% номинальное; конечно, источник должен быть таким, чтобы для него самого это повышение напряжения не представляло опасности. На случай пробоя междувитковой изоляции обмотки якоря может быть предусмотрена защита для автоматического отключения испытываемой машины от источника; однако если источником служит отдельный синхронный генератор, это не является строго обязательным, так как в случае обнаружения замыкания витков вполне достаточно снять возбуждение вручную одновременно и с источника, и с испытываемой машины.

Понижая постепенно напряжение источника и регулируя возбуждение каждый раз так, чтобы потребляемый ток был наименьшим, можно получить ряд отсчетов для построения характеристики холостого хода. Нижним пределом этой характеристики будет служить то наименьшее напряжение источника, при котором испытываемая машина еще не выпадает из синхронизма.

Однако недостатком характеристики холостого хода, снятой таким способом, является то, что ее нижняя часть неопределенна. Напряжение от остаточного намагничивания иногда оканчивается возможным определить на выбеге после отключения испытываемой машины от источника, но для этой цели необходимо точно измерить скорость вращения или частоту в момент отсчета напряжения.

Задача установления при каждом отсчете коэффициента мощности, равного единице, решается применением схемы двух ваттметров; равенство их показаний в момент отсчета является гарантией того, что потребляемый ток имеет наименьшее значение. Достаточно очень небольшого сдвига фаз, чтобы показания ваттметров заметно разошлись. Наличие ваттметров в схеме опыта дает возможность одновременно с характеристикой холостого хода снять также и зависимость потерь холостого хода от

напряжения; но для этой цели необходимо, чтобы возбуждение подавалось от независимого источника, чтобы избежать затруднений при обработке результатов испытания.

Разделение потерь холостого хода на механические потери и потери в сердечнике якоря может быть произведено так же, как и для машин постоянного тока; предварительно из потерь, измеренных ваттметрами, следует вычесть потери в обмотке якоря, которые хотя и очень невелики ввиду малости тока, потребляемого машиной, но все же заметны. Эти потери могут быть вычислены как произведение квадрата фазового тока на число фаз и на сопротивление фазы при температуре опыта.

Точность определения суммы потерь холостого хода этим способом не уступает той, которая может быть достигнута при вращении машины в режиме генератора т.р.ированным двигателем, но разделение суммы потерь на механические потери и потери в стали несколько менее точно по причине отсутствия отсчетов при сильно пониженном напряжении и без возбуждения.

При любом способе проведения опыта холостого хода измерение потерь очень крупных машин встречает затруднение в том отношении, что трудно добиться устойчивых показаний приборов, по которым производится измерение мощности. Это объясняется тем, что большие маховые массы не могут следовать незначительным колебаниям частоты и напряжения источника питания, в особенности когда таким источником служит сеть большой мощности или другая столь же крупная машина, как и испытываемая. Поэтому приходится долго выжидать момента успокоения приборов, позволяющего взять отсчет, или же, при более или менее регулярных качаниях стрелок, отмечать их средние положения.

Значительно меньше это явление сказывается при питании от сравнительно маломощного источника, отделенного от мощной сети участком передачи энергии постоянным током.

Неплохие результаты дает применение счетчиков энергии, описанное в § 1-14, однако оно сильно затягивает проведение опыта.

Проверка симметричности напряжений при опыте холостого хода в режиме двигателя затруднена тем, что напряжение определяется не только самой испытываемой машиной, но и источником ее питания. Она может быть произведена, когда машина имеет доступную нулевую точку; если же ее нет, то остается довольствоваться проверкой симметричности токов, потребляемых фазами.

Зато проверка следования фаз и обозначение выводов обмотки якоря не требует никаких дополнительных операций, если следование фаз источника питания известно, как это и должно быть на всякой испытательной станции.

При проведении опыта следует учитывать, что подлежащие

измерению потребляемые токи во много раз меньше номинального, между тем как при любом способе пуска двигателя, за исключением разворачивания посторонним двигателем с последующей синхронизацией, которое в данном случае должно быть исключено из рассмотрения, токи либо имеют один порядок с номинальным, либо даже превосходят его. По этой причине необходимо позаботиться о надежной шунтировке измерительной схемы на время пуска, чтобы иметь возможность пользоваться при опыте трансформаторами тока с достаточно низким пределом измерения (порядка не выше 10% от номинального тока).

### 3-6. Короткое замыкание синхронного генератора

Затруднения, встречающиеся при осуществлении короткого замыкания генератора постоянного тока, совершенно отсутствуют в случае синхронного генератора; единственным общим

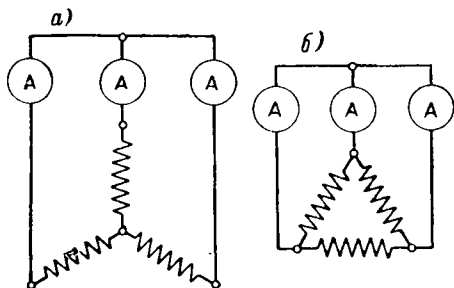


Рис. 3-1. Симметричное короткое замыкание трехфазной машины при сопряжении фаз:  
а — в звезду; б — в треугольник.

требованием является малость сопротивления внешней цепи короткого замыкания, причем не только активного, но и индуктивного. Удовлетворение этого требования нетрудно — достаточно, чтобы проводники, которыми замыкаются зажимы машины, были не только надлежащего сечения, но и наименьшей возможной длины, а если по каким-либо причинам им приходится придавать более или менее значительную длину, то для уменьшения потоков рассеяния следует сближать эти проводники как можно теснее, по возможности по всей их длине. Длина проводников внешней цепи короткого замыкания определяется наименьшим возможным расстоянием между замыкаемыми зажимами и трансформаторами тока, служащими для измерения тока короткого замыкания.

Короткое замыкание многофазного генератора называется симметричным, если замыкаются накоротко все линейные зажимы его обмотки; остальные случаи коротких замыканий получают общее название несимметричных. Они рассматриваются ниже в § 3-21.

В тех случаях, когда желательно измерять токи короткого замыкания во всех трех фазах, цепь короткого замыкания должна быть собрана так, чтобы образовывалась внешняя нулевая точка, как это показано на рис.

3-1, *а* для сопряжения фаз в звезду и на рис. 3-1, *б* — для сопряжения их в треугольник.

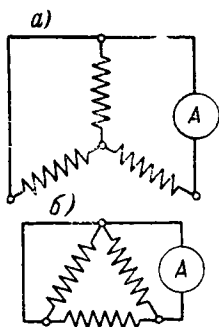


Рис. 3-2. Упрощенное симметричное короткое замыкание.

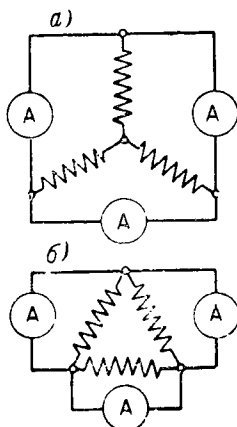


Рис. 3-3. Неправильные схемы симметричного короткого замыкания.

Однако в таком измерении далеко не всегда встречается необходимость; если симметричность фаз проверена при холостом ходе, то при современных конструкциях обмоток нет оснований предполагать, что токи короткого замыкания в фазах будут отличаться друг от друга, и измерение всех трех токов скорее носит характер взаимной проверки применяемых приборов. Поэтому можно считать нормальным, когда измерению подвергается только один из трех токов короткого замыкания; а при этом внешняя цепь может быть значительно упрощена, как показано на рис. 3-2, *а* для сопряжения фаз в звезду и на рис. 3-2, *б* — для сопряжения их в треугольник. Несмотря на кажущуюся несимметричность этих схем, осуществляемое ими короткое замыкание вполне симметрично. Напротив, при дополнительном подсоединении еще одного проводника, как показано на рис. 3-3, *а* для сопряжения в звезду и на рис. 3-3, *б* для сопряжения в треугольник, опыт дает совершенно неверные ре-

зультаты: распределение токов во внешней цепи будет зависеть от ничтожных различий в сопротивлениях отдельных ее частей, уравнивать которые практически невозможно.

При наличии доступной нулевой точки обмотки возможна разновидность симметричного короткого замыкания, которая может быть названа замыканием всех трех фаз на нулевую точку (рис. 3-4). Это замыкание не равноценно нормальному симметричному короткому замыканию по схеме рис. 3-1, а, так как здесь каждая фаза замыкается накоротко в отдельности; вследствие этого токи короткого замыкания содержат высшие гармонические порядков, кратных тем, которые при нормальной схеме отсутствуют. Оно находит применение только в некоторых специальных случаях и потому подробно не рассматривается.

Для машин с числом фаз, большим трех, количество возможных способов симметричных коротких замыканий значительно возрастает; однако случаи применения многофазных систем настолько редки, что в подробном их рассмотрении нет необходимости.

### 3-7. Опыт короткого замыкания в режиме генератора

Если для генератора постоянного тока снятие характеристики короткого замыкания имеет только вспомогательное значение, то для синхронного генератора оно является одним из важнейших основных опытов.

Причина этого различия заключается в том, что явление реакции якоря в машинах постоянного тока играет много меньшую роль, чем в синхронных машинах.

В машинах постоянного тока поле реакции якоря при щетках в нейтральном положении является чисто поперечным, а в компенсированных машинах это поле вообще подавлено, вследствие чего его влияние на общее магнитное состояние машины или невелико, или даже практически отсутствует. В синхронных машинах, напротив, оно обладает сильно выраженной продольной составляющей даже при умеренных сдвигах фаз между напряжением на зажимах и током, а при чисто реактивной нагрузке и при коротком замыкании превращается в почти чисто продольное.

Поэтому составляющая тока возбуждения, уравнивающая реакцию якоря, при коротком замыкании машины постоянного тока настолько невелика, что не всегда поддается опреде-

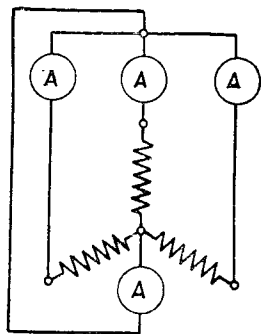


Рис. 3-4. Короткое замыкание трех фаз на нулевую точку.



лению, между тем как в синхронной машине она представляет зачастую основную часть тока возбуждения. Следствием этого являются два обстоятельства, характерные для синхронной машины: относительно низкая величина тока короткого замыкания и сильная зависимость напряжения от нагрузки при неизменном возбуждении. Значительно меньшую долю тока возбуждения при коротком замыкании синхронной машины составляет та его часть, которая необходима для создания в обмотке э. д. с., покрывающей падение напряжения в цепи короткого замыкания.

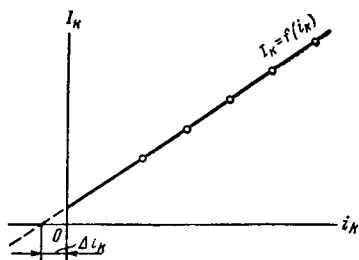


Рис. 3-5. Определение поправки на смещение характеристики короткого замыкания.

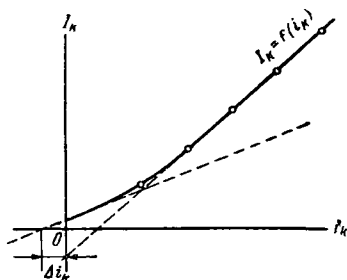


Рис. 3-6. Особый вид характеристики короткого замыкания.

Индуктивное сопротивление обмотки обычно во много раз превосходит активное; поэтому в машинах прямого исполнения практически все сопротивление цепи короткого замыкания равно индуктивному сопротивлению обмотки, если, конечно, сопротивление внешней части цепи может быть принято равным нулю. В машинах обращенного исполнения в величину активного сопротивления должно быть включено еще переходное сопротивление контакта щеток на кольцах, зависящее от плотности тока в контакте; однако и оно в несколько раз меньше индуктивного сопротивления обмотки. Если последнее остается постоянным, не завися от тока, то характеристика короткого замыкания должна представлять прямую линию. Так она и выглядит в машинах с открытыми пазами.

Если до начала снятия характеристики короткого замыкания машина не имеет остаточного намагничивания, то характеристика короткого замыкания  $I_k = f(i_k)$  проходит через начало координат, т. е. ток короткого замыкания  $I_k$  пропорционален току возбуждения  $i_k$ ; в противном случае она более или менее значительно отклоняется от начала координат, и для построения характеристики необходимо определять поправку  $\Delta i_k$  к току возбуждения для приведения к началу координат, как показано на рис. 3-5.

Но если машина имеет закрытые пазы, то при очень небольших токах короткого замыкания индуктивное сопротивление обмотки относительно велико, так как перемычки, перекрывающие пазы, представляют пути с малым магнитным сопротивлением для образования потоков рассеяния. По этой причине начальная часть характеристики короткого замыкания имеет небольшой наклон, который и сохранился бы далее, если бы с увеличением тока короткого замыкания не происходило быстрое насыщение перемычек, в результате которого их проводимость резко падает; вместе с ней падает и индуктивное сопротивление обмотки, а наклон характеристики увеличивается (рис. 3-6).

Здесь было бы ошибочным определять поправку  $\Delta i_k$  к току возбуждения путем экстраполяции верхней части до пересечения с осью абсцисс; следовало бы экстраполировать нижнюю часть характеристики. Однако достоверное снятие этой части затруднительно; оно требовало бы смены пределов приборов, измеряющих ток короткого замыкания, что крайне неудобно. Поэтому лучше перед наложением короткого замыкания размагничивать машину до полного уничтожения остаточного намагничивания с тем, чтобы характеристика короткого замыкания действительно исходила из начала координат и надобность в применении поправки отпадала.

Такое размагничивание производится подачей возбуждения в направлении, противоположном тому, которое имело место в предыдущих опытах, с измерением напряжения на зажимах после снятия возбуждения; операция эта требует терпения и навыка, так как очень нетрудно перемангнитить машину в противоположном направлении. В машине постоянного тока перемангничивание отмечается изменением направления показаний магнитоэлектрического вольтметра; но отклонения приборов всех систем, применяемых при переменном токе, происходят всегда в одну и ту же сторону, и судить о правильности направления размагничивающих токов возбуждения можно только по влиянию малых изменений этих токов на величину напряжения.

Надежный, хотя и кропотливый, способ размагничивания состоит в том, что возбуждение подается поочередно в том и в другом направлении, а наибольший его ток каждый раз уменьшается; но подобный прием достигает цели только тогда, когда такое постепенное снижение доводится до самых ничтожных значений тока возбуждения.

Влияние направления изменения тока возбуждения на характеристику короткого замыкания, определяемое явлением гистерезиса, настолько невелико, что может быть обнаружено только приборами с минимальной вариацией, в высокой степени свободными от тормозящих моментов.

Практически достаточно ограничиваться снятием только одной ветви характеристики; если оно сопровождается измерением

потерь короткого замыкания, то всегда нужно предпочитать нисходящую ветвь, т. е. производить снятие характеристики при убывающих токах.

Влияние температуры обмотки на величину тока короткого замыкания настолько ничтожно, что не может быть обнаружено даже самыми лучшими приборами; но этого нельзя сказать относительно потерь короткого замыкания.

В отличие от машин постоянного тока, определение потерь короткого замыкания в синхронных машинах имеет самостоятельное важное значение, так как позволяет определить добавочные потери, выраженные в синхронных машинах очень сильно. Действительно, при коротком замыкании мощность, подводимая тарированным двигателем к испытываемой синхронной машине, расходуется на покрытие механических потерь, основных потерь в обмотке якоря и добавочных потерь, которые состоят главным образом из потерь от вихревых токов в обмотке и магнитных материалах — как активных, так и неактивных (нажимные плиты, щиты, корпус и т. д.).

Механические потери известны из опыта определения и разделения потерь холостого хода; как и в случае машины постоянного тока, они рассматриваются как зависящие только от скорости вращения, а так как последняя в синхронных машинах имеет одно определенное значение, то они считаются постоянными, хотя в действительности потери на трение щеток на контактных кольцах зависят от плотности тока в переходном контакте.

Основные потери в обмотке якоря определяются подсчетом, если известны сопротивление обмотки в холодном состоянии и ее температура  $\vartheta$  во время опыта короткого замыкания. Последняя может контролироваться посредством заложенных температурных детекторов, которыми, согласно ГОСТ 183-55, п. 21, снабжаются все синхронные машины мощностью 5000 *кв*а и выше или с длиной сердечника в 1 м и более; если же их нет, то можно удовольствоваться измерением сопротивления обмотки непосредственно по окончании опыта короткого замыкания.

Остаток от вычитания механических потерь  $P_{\tau}$  и основных потерь в обмотке из подведенной тарированным двигателем мощности  $P$  представляет искомые добавочные потери:

$$P_d = P - P_{\tau} - m I_{\kappa 15}^2 r_{15} [1 + 0,004 (\vartheta - 15)] [\text{вт}].$$

Сумма основных потерь, приведенных к 75° С, и добавочных потерь носит название потерь короткого замыкания:

$$P_{\kappa} = m I_{\kappa 75}^2 r_{75} + P_d [\text{вт}].$$

Потери  $P_{\kappa}$  обычно откладываются в зависимости от тока короткого замыкания на общем графике с характеристикой короткого замыкания, как показано на рис. 3-7.

По ним определяется действующее сопротивление обмотки якоря:

$$r_d = \frac{P_k}{mI_k^2} = r_{15} + \frac{P_d}{mI_k^2} [\text{ом}].$$

Отношение его к сопротивлению, измеренному постоянным током и приведенному к  $75^\circ\text{C}$ , может быть названо коэффициентом добавочных потерь:

$$k_d = \frac{r_d}{r_{15}}.$$

Некоторое осложнение получается при определении добавочных потерь для трехфазных машин с сопряжением фаз обмотки якоря в треугольник. В опыте снятия характеристики обычно из-

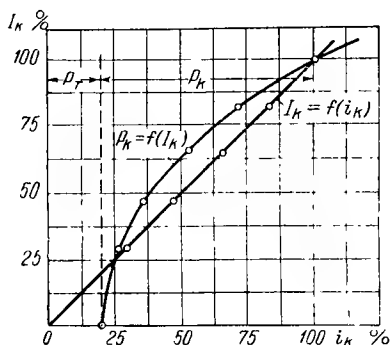


Рис. 3-7. Пример характеристики короткого замыкания.

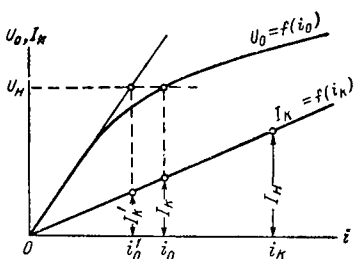


Рис. 3-8. Определение отношения короткого замыкания.

меряется линейный ток короткого замыкания; но в фазах обмотки якоря, помимо фазового тока, который в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного, существует еще система токов высших гармонических с порядками, кратными трем. Поэтому, если измерять ток внутри замкнутого треугольника, то отношение линейного тока к нему будет меньше, чем  $\sqrt{3}$ . Потери, создаваемые токами этих гармонических, приходится включать в состав добавочных, полагая фазовый ток в  $\sqrt{3}$  раз меньшим линейного.

Таким образом, добавочные потери в этом случае вычисляются по формуле

$$P_d = P - P_r - I_k^2 r_{15} [1 + 0,004 (9 - 15)] [\text{вт}],$$

где  $I_k$  — линейное значение тока короткого замыкания.

Сопоставление характеристики холостого хода и характеристики симметричного короткого замыкания позволяет определить весьма важную величину — отношение короткого замыкания ( $ОКЗ$ ), под которым понимается отношение тока короткого замыкания  $I_k$  при токе возбуждения  $i_0$ , соответствующем номинальному напряжению холостого хода, к номинальному току  $I_n$ :

$$ОКЗ = \frac{I_k}{I_n}.$$

Как видно из рис. 3-8, это отношение может быть заменено отношением соответствующих токов возбуждения:

$$ОКЗ = \frac{i_0}{i_k},$$

где  $i_k$  — ток возбуждения, соответствующий по характеристике короткого замыкания номинальному значению тока якоря  $I_n$ .

Если в расчет принимается ток возбуждения  $i_0$ , взятый прямо из характеристики холостого хода, то вычисленное значение  $ОКЗ$  соответствует ненасыщенному состоянию машины; если же принять ток возбуждения  $i'_0$ , соответствующий номинальному напряжению по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода, то значение  $ОКЗ$  будет соответствовать ненасыщенному состоянию.

Величина  $ОКЗ$  ни одним из стандартов на синхронные машины не нормирована, но нередко устанавливается в технических условиях.

Обычно для машин с неявновыраженными полюсами  $ОКЗ < 1$ , для быстроходных машин с явновыраженными полюсами близко к единице, а для тихоходных машин с явновыраженными полюсами  $ОКЗ > 1$ .

Для определения  $ОКЗ$  следует пользоваться характеристиками холостого хода и короткого замыкания, приведенными к началу координат.

Благодаря подавляющему преобладанию реактивного сопротивления обмотки якоря над активным ток короткого замыкания при неизменном токе возбуждения практически не зависит от частоты; лишь при самых

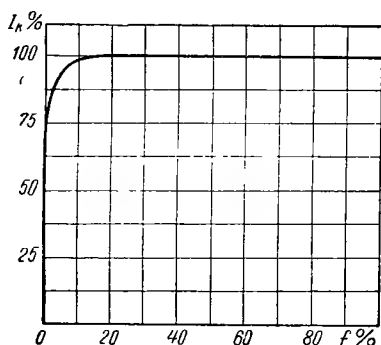


Рис. 3-9. Зависимость тока короткого замыкания от частоты.

низких частотах он начинает резко спадать (рис. 3-9). По этой причине никаких поправок на отклонение частоты от номинальной для характеристики короткого замыкания не требуется; что же касается потерь короткого замыкания, то из них зависят от частоты только добавочные потери, которые можно принять пропорциональными квадрату частоты.

### 3-8. Опыт короткого замыкания на выбеге

Непосредственно в режиме двигателя опыт короткого замыкания произведен быть не может; но его можно осуществить во время выбега после отключения испытываемой машины от источника питания.

Основанием для этого является отмеченное выше свойство синхронной машины, что при неизменном токе возбуждения ток короткого замыкания практически не зависит от скорости вращения или частоты. Только при самых низких скоростях вращения он начинает уменьшаться; соответствующие им частоты настолько малы, что стрелки обычно применяемых амперметров начинают колебаться с частотой тока, прежде чем удастся установить заметное понижение тока короткого замыкания.

Благодаря этому свойству можно произвести опыт короткого замыкания на выбеге следующим образом (рис. 3-10): цепь короткого замыкания подготавливается заранее; немедленно после отключения выключателем *B1* вращающейся испытываемой машины *ИСМ* от источника питания *ПГТ*, автоматом гашения поля *АГП* с нее снимается возбуждение, выключателем *B2* производится короткое замыкание и тотчас возбуждение снова поднимается до тех пор, пока в цепи короткого за-

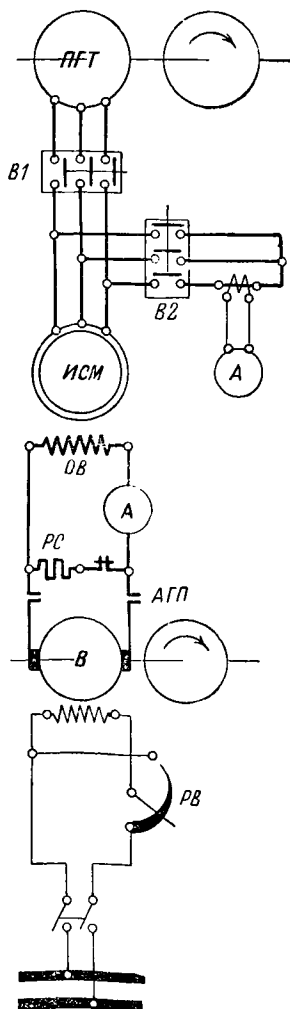


Рис. 3-10. Схема опыта короткого замыкания на выбеге.

мыкания не установится ток, близкий к номинальному. При этом машина очень энергично затормаживается потерями короткого замыкания; однако обычно все же удается произвести вполне надежный отсчет, прежде чем она остановится.

В большинстве случаев можно удовлетвориться одним таким отсчетом; но если есть основание предполагать, что характеристика короткого замыкания не направлена в начало координат, опыт может быть повторен при нескольких разных значениях тока короткого замыкания.

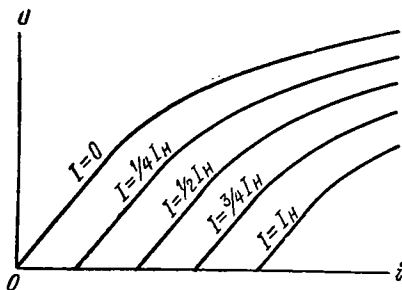
Недостатком опыта является то, что он не дает возможности непосредственного определения потерь короткого замыкания. Поэтому его нельзя рекомендовать для типовых испытаний; что же касается контрольных испытаний, то основной областью его применения являются тихоходные машины с относительно большим маховым моментом, не имеющие пристроенных возбудителей, которые могли бы быть использованы в качестве приводных двигателей.

### 3-9. Снятие нагрузочной характеристики

Под нагрузочной характеристикой синхронной машины понимается зависимость напряжения от тока возбуждения при неизменном токе нагрузки, неизменном коэффициенте мощности и неизменной частоте.

Таким образом, нагрузочная характеристика представляет некоторое подобие характеристики холостого хода, но снятое при нагрузке; или, иначе говоря, характеристика холостого хода представляет частный случай нагрузочной характеристики при токе нагрузки, равном нулю (рис. 3-11).

Среди возможных нагрузочных характеристик синхронной машины наибольший практический интерес представляет характеристика, снятая при номинальном токе и чисто индуктивной нагрузке ( $\cos \varphi = 0$ ), т. е. при перевозбуждении, и, собственно говоря, лишь ее точка при напряжении, равном номинальному. В



подавляющем большинстве случаев опыт может ограничиться снятием этой точки; он принципиально возможен и в режиме двигателя, как предписывает стандарт, и в режиме генератора, что при соблюдении некоторых условий обеспечивает даже более точные результаты.

Опыт можно производить следующими способами.

Рис. 3-11. Нагрузочные характеристики.





и вторично перенести характеристику холостого хода так, чтобы ее начало  $O$  совпало с точкой  $O''$ . Точка  $C$ , лежащая на этой характеристике при номинальном значении напряжения, с практически достаточной степенью точности будет представлять исправленный результат опыта. Перпендикуляр  $CD$ , опущенный из нее на ось абсцисс, даст ток возбуждения  $i_{00} = \overline{OD}$ , необходимый для поддержания номинального тока при номинальном напряжении и  $\cos \varphi = 0$ . Если опыт произведен при номинальном токе, но при напряжении выше номинального, уже первый перенос характеристики холостого хода дает искомую точку (точка  $C'$ ).

2. Если в наличии есть еще одна синхронная машина с тем же номинальным напряжением, но не менее чем примерно в полтора раза большей мощности, то испытываемую машину можно заставить работать на нее, что представляет по сравнению с предыдущим случаем то преимущество, что и ток, и напряжение испытываемой машины могут быть установлены номинальными. Опыт может быть произведен в двух вариантах.

а) Если вторая синхронная машина — вспомогательная — имеет свой приводной двигатель, то обе машины приводятся от своих двигателей и затем синхронизируются друг с другом, после чего одновременно производится повышение возбуждения испытываемой машины и понижение возбуждения вспомогательной до тех пор, пока не будет установлен требуемый режим. Если по крайней мере один из приводных двигателей, безразлично который, является двигателем постоянного тока, можно добиться того, чтобы между обеими машинами совершенно не происходило обмена активных мощностей, что, впрочем, не является строго обязательным.

б) Если вспомогательная синхронная машина не имеет своего приводного двигателя, то обе машины пускаются синхронно. Дальнейшие операции производятся по-прежнему, но только в данном случае все потери вспомогательной машины покрываются от испытываемой, и потому коэффициент мощности последней будет отличен от нуля; однако неточность, вносимая этим обстоятельством в результаты опыта, очень невелика. Мощность приводного двигателя должна быть достаточна для разворачивания всей системы и покрытия потерь в обеих синхронных машинах.

Если мощность вспомогательной синхронной машины недостаточна, то опыт не удастся произвести при номинальных значениях тока и напряжения; еще до достижения этих значений обнаруживается, что возбуждение вспомогательной машины полностью снято, и, следовательно, дальнейшее повышение возбуждения испытываемой машины наряду с увеличением тока вызовет увеличение напряжения. Тогда можно либо пойти на прове-

дение опыта при повышенном напряжении с введением описанной поправки, если это повышение получается небольшим, либо прибегнуть к осторожной подаче вспомогательной машине отрицательного возбуждения.

3. Если ни первый, ни второй способы неприменимы, остается только нагружать испытываемую машину индуктивным сопротивлением, в качестве которого может служить реактор, крупный ненагруженный трансформатор или асинхронный двигатель, в особенности с фазовым ротором, оставляя который разомкнутым, можно не загружать испытываемую машину механическими потерями двигателя.

Если нагрузка и отличается более или менее от чисто индуктивной за счет потерь в приемниках, то это не вносит существенной неточности в результат опыта.

При таком способе нагрузки нельзя рассчитывать на то, чтобы и напряжение, и ток одновременно имели номинальные значения, и потому необходимо применение описанной выше поправки.

### 3-10. Снятие V-образной характеристики

Если начать изменять ток возбуждения синхронной машины, работающей параллельно с мощным источником, то ток, забираемый ею от источника, будет изменяться и по величине, и по фазе: понижение тока возбуждения против того значения, которое соответствует наименьшему потребляемому току при данном напряжении, или недовозбуждение, вызывает потребление тока, отстающего от напряжения источника, т. е. превращает машину по отношению к источнику в индуктивный приемник, а повышение тока возбуждения против этого значения, или перевозбуждение, вызывает потребление тока, опережающего напряжение источника, т. е. машина становится по отношению к источнику как бы емкостным приемником, переходя в режим синхронного компенсатора.

Зависимость тока якоря от тока возбуждения при неизменном напряжении на зажимах, благодаря своей характерной форме (рис. 3-13), носит название V-образной характеристики. Эта характеристика может сниматься как в режиме двигателя, так и в режиме генератора, притом при различных активных нагрузках; но наибольший интерес представляет характеристика, снятая в режиме ненагруженного двигателя ( $P_2 = 0$ ).

Точка этой характеристики, соответствующая номинальному потребляемому току при перевозбуждении, является одновременно точкой нагрузочной характеристики, получение которой описано в § 3-9.

Представляется крайне заманчивым, измеряя мощность, подведенную к машине в этом режиме, сразу определить сумму

всех потерь, соответствующих номинальной нагрузке, кроме потерь на возбуждение, которые здесь не соответствуют номинальному режиму, но при возбуждении от независимого источника не участвуют в измерении.

Однако, как было показано в § 1-14, при очень низких значениях коэффициента мощности, какие имеют место в этом опыте, на правильность результатов измерений очень сильно влияют угловые погрешности измерительных трансформаторов, что особенно заметно при применении полукосвенных схем из-

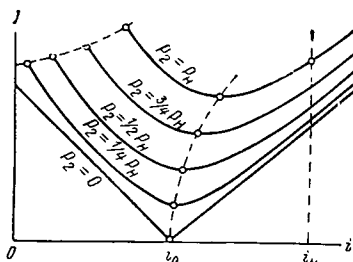


Рис. 3-13. V-образные характеристики.

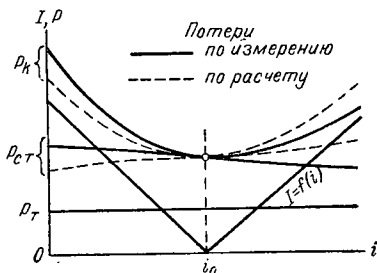


Рис. 3-14. Зависимость измеренной потребляемой мощности от тока возбуждения при снятии V-образной характеристики.

мерения мощности. В результате этого наблюдается, что при одном и том же токе измеренная мощность при недовозбуждении оказывается большей, чем при перевозбуждении (рис. 3-14).

Но когда может быть произведено измерение мощности по непосредственной схеме, картина получается обратная, так как при перевозбуждении внутренняя э. д. с. и определяющий ее магнитный поток, а вместе с ним и потери в стали якоря более высоки, чем при недовозбуждении.

В режиме перевозбужденного двигателя может быть проведено испытание на кратковременную перегрузку по току; но так как нормально было бы очень затруднительно так поднять возбуждение машины, чтобы она при номинальном напряжении перегрузилась по току на 50 %, то приходится проводить это испытание при пониженном напряжении, что, однако, повышает склонность машины к выпадению из синхронизма.

### 3-11. Определение номинального тока возбуждения и номинального изменения напряжения

Описанные выше опыты позволяют определить ток возбуждения, который будет иметь место при номинальной и всякой иной нагрузке, не производя опыта нагрузки, который даже для не-

больших синхронных машин представляется зачастую трудно осуществимым.

Для машин с неявновыраженными полюсами определение тока возбуждения производится посредством построения векторной диаграммы, использующей данные опытов холостого хода и короткого замыкания и известной под наименованием диаграммы Потье.

Это построение делается следующим образом (рис. 3-15). К вектору фазового тока якоря  $I$  под углом  $\varphi$ , соответствующим заданному коэффициенту мощности  $\cos \varphi$ , пристраивается вектор фазового напряжения на зажимах  $U$ . Для того чтобы получить действующую в машине э. д. с.  $E_a$ , необходимо пристроить к вектору напряжения  $U$  векторы активного и реактивного падений напряжения в обмотке якоря, которые можно обозначить соответственно через  $I r_1$  и  $I x_p$ . Здесь под  $r_1$  следует понимать сопротивление обмотки одной фазы переменному току при расчетной рабочей температуре  $75^\circ \text{C}$ , а под  $x_p$  — реактивное сопротивление, приписываемое обмотке одной фазы при вращении и ротора.

Первое из них даже в очень небольших машинах настолько ничтожно, что падением напряжения  $I r_1$  почти всегда можно пренебречь, не внося этим сколько-нибудь заметной ошибки.

Реактивное сопротивление  $x_p$  непосредственно измерено быть не может. Поэтому для его определения приходится применять косвенные способы, рассматриваемые ниже; заодно эти способы дают и другую величину, необходимую для построения диаграммы — составляющую тока возбуждения  $i_a$ , уравнивающую реакцию якоря.

Вектор найденного тем или иным способом реактивного падения напряжения  $I x_p$  пристраивается к концу вектора напряжения на зажимах машины  $U$ . Так как реактивное падение напряжения опережает создающий его ток на четверть периода, то вектор  $I x_p$  должен быть отложен перпендикулярно к вектору тока  $I$ . Геометрическая сумма векторов  $U$  и  $I x_p$  представляет вектор э. д. с.  $E_a$ , реально существующей в машине при рассматриваемом режиме.

По характеристике холостого хода для э. д. с.  $E_a$  определяется ток возбуждения  $i_a$ , который является составляющей тока возбуждения при данной нагрузке,

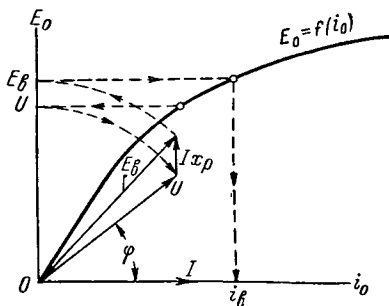


Рис. 3-15. Построение векторной диаграммы синхронной машины (I этап).



ных значений, то удобнее и диаграмму строить на линейных значениях; лишь при подсчете составляющей тока возбуждения, уравнивающей реакцию якоря, следует не забывать, что в формулу входит фазовый ток, поэтому, если в действительности машина имеет сопряжение фаз в треугольник, следует превратить сначала линейный ток в фазовый.

Операция построения диаграммы не отличается особой сложностью; но когда приходится строить большое количество диаграмм, целесообразно применять специально предназначенные для этого приборы.

На рис. 3-18 представлен прибор, разработанный автором и состоящий из нескольких линеек с делениями, шарнирно связанных друг с другом так, что на них воспроизводится построение диаграммы; отсчеты на линейках могут быть сделаны как в относительных единицах, так и в вольтах и амперах, и берутся по нониусам. Точность результатов при пользовании прибором не уступает точности графических построений, а работа производится в несколько раз быстрее.

Хотя описанная диаграмма предназначена для машин с неявновыраженными полюсами, но ее очень часто применяют и к машинам с явновыраженными полюсами. Практика показывает, что токи возбуждения, а тем более изменения напряжения, получаемые в результате распространения диаграммы на такие машины, отличаются от действительных настолько мало, что оно

вполне оправдывается, в особенности, когда номинальный коэффициент мощности меньше единицы. Ниже, в § 3-30, излагается способ определения величины, близкой к  $x_p$ , при удаленном индукторе; здесь же даются два способа его косвенного определения, попутно дающие также составляющую тока возбуждения  $i_{я}$ .

1. Если произведены опыты холостого хода, короткого замыкания и нагрузки при  $\cos \varphi = 0$ , то реактивное падение напряжения  $I x_p$  может быть определено следующим образом.

На общий график с характеристикой холостого хода (рис. 3-19) наносится точка  $A$ , соответствующая нагрузке машины данным током  $I$  при данном напряжении  $U$  и  $\cos \varphi = 0$ . От точки  $A$  влево откладывается отрезок  $\overline{AD}$ , равный току воз-

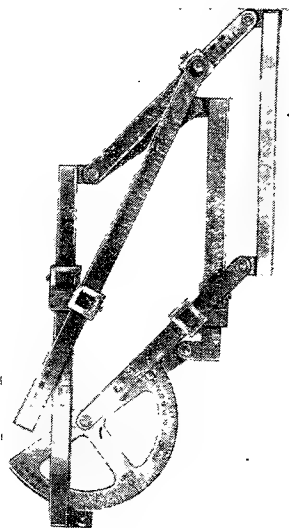


Рис. 3-18. Прибор, заменяющий построение диаграммы.

буждения  $i_k$  при симметричном коротком замыкании с током  $I_k = I$ . Через точку  $D$  проводится прямая, параллельная нижней прямолинейной части характеристики холостого хода. Длина перпендикуляра  $BC$ , опущенного на отрезок  $AD$  из точки пересечения  $B$  этой прямой с характеристикой холостого хода, представляет искомое реактивное падение напряжения  $Ix_p$ , а отрезок  $AC$ , отсекаемый им на прямой  $AD$ , — составляющую тока возбуждения  $i_{я}$ , уравнивающую реакцию якоря.

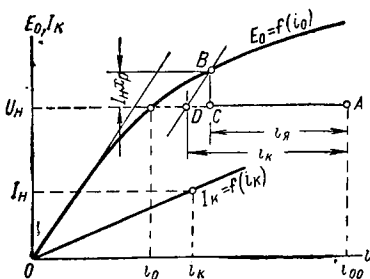


Рис. 3-19. Определение реакции якоря и реактивного падения напряжения из опыта при  $\cos \varphi = 0$ .

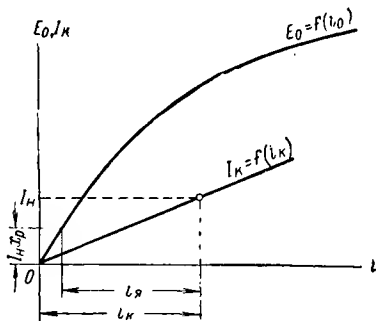


Рис. 3-20. Определение реактивного падения напряжения по расчетной реакции якоря.

Действительно, при коротком замыкании ток возбуждения состоит из двух частей: части  $i_{я} = \overline{AC}$ , идущей на уравнивание реакции якоря, которая и при коротком замыкании, и при чисто индуктивной нагрузке является продольной размагничивающей, и части  $\overline{DC}$ , необходимой для создания э. д. с., уравнивающей индуктивное падение напряжения в обмотке  $Ix_p$ .

2. Если известны все данные обмоток статора и ротора, то для машин с неявновыраженными полюсами необходимость в опыте снятия нагрузочной характеристики при  $\cos \varphi = 0$  отпадает, так как составляющая тока возбуждения, уравнивающая реакцию якоря, может быть подсчитана по формуле

$$i_{я} = \frac{3\sqrt{2} \omega_1 k_1 a_2}{2\omega_2 k_2 a_1} = \frac{2,12\omega_1 k_1 a_2}{\omega_2 k_2 a_1},$$

где  $\omega_1$  — число витков одной фазы обмотки якоря;

$\omega_2$  — число витков обмотки индуктора;

$k_1$  и  $k_2$  — их обмоточные коэффициенты;

$a_1$  и  $a_2$  — их числа параллельных ветвей.

Отняв от тока возбуждения  $i_k$  при данном токе короткого замыкания  $I_k = I$  составляющую  $i_{я}$ , нетрудно определить э. д. с.,

уравновешивающую реактивное падение напряжения  $I x_p$ , которая по характеристике холостого хода соответствует остатку от этого вычитания.

Этот же способ может быть применен и для машин с явно выраженными полюсами, если положить  $k_2 = 1$ ; но построение диаграммы дает для них не столь хорошее совпадение с действительностью, как для машин с неявно выраженными полюсами, так как подсчитанная по этой формуле составляющая  $i_a$  недостаточно точно совпадает с определенной на основании опыта при  $\cos \varphi = 0$ .

Если требуется произвести определение большого количества токов возбуждения для режимов, объединенных каким-нибудь общим признаком, как, например, общими значениями напряжения и коэффициента мощности для построения регулировочной характеристики, бывает целесообразно заменить графическое построение расчетным, основанным на решении треугольников, составляющих диаграмму.

Из треугольника  $OAB$  (рис. 3-21) определяется э. д. с.

$$E_b = \sqrt{U^2 \cos^2 \varphi + (U \sin \varphi + I x_p)^2}.$$

Когда по характеристике холостого хода найден соответствующий ей ток возбуждения  $i_b$ , то полный ток возбуждения  $i_n$  определяется из треугольника  $OCD$ :

$$i_n = \sqrt{i_b^2 + i_a^2 + 2 i_b i_a \sin \psi},$$

где

$$\sin \psi = \frac{U \sin \varphi + I x_p}{E_b}.$$

Вычисления целесообразно сводить по отдельным этапам в таблицу, что облегчает их выполнение и последующую проверку.

Необходимо упомянуть некоторые построения, применяемые за рубежом. Из них наибольшим распространением пользуется диаграмма, рекомендованная американскими нормами. Для построения этой диаграммы требуются те же исходные данные, что и для диаграммы для машин с неявно выраженными полюсами: характеристика холостого хода, характеристика симметричного короткого замыкания и реактивное сопротивление  $x_p$ . Подобно этой диаграмме, внутренняя э. д. с.

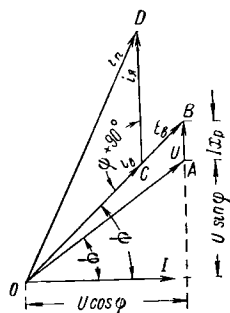


Рис. 3-21. Пояснение к расчетному определению тока возбуждения.



$E_b$  определяется как геометрическая сумма напряжения на зажимах  $U$  и реактивного падения напряжения  $Ix_p$ . Затем по характеристике холостого хода определяются токи возбуждения,

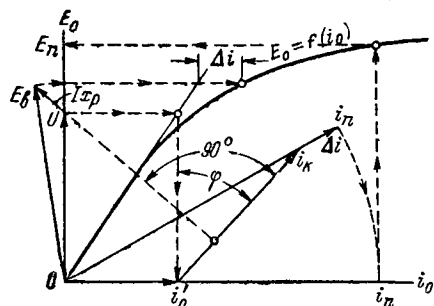


Рис. 3-22. Диаграмма, рекомендованная американскими нормами.

соответствующие напряжениям  $U$  и  $E_b$ ; но от первого из них берется только часть  $i_0'$ , соответствующая зазору, а от второго — только часть  $\Delta i$ , соответствующая ферромагнитным участкам пути магнитного потока (рис. 3-22).

Искомый ток возбуждения при нагрузке  $i_n$  представляет геометрическую сумму трех составляющих: тока  $i_0'$ , тока воз-

буждения  $i_k$  при симметричном коротком замыкании, наклоненного к первому под углом  $90^\circ - \varphi$ , и тока  $\Delta i$ , отложенного на продолжении геометрической суммы первых двух токов.

Если имеется возможность проведения опыта нагрузки при  $\cos \varphi = 0$ , то для машин с явно выраженными полюсами можно применять построение диаграммы, рекомендованной шведскими нормами (рис. 3-23).

Это построение производится следующим образом: по одной и той же прямой от точки  $O$  откладываются векторы тока возбуждения  $i_0$  при холостом ходе и данном напряжении  $U$  и тока возбуждения  $i_{00}$  при нагрузке данным током  $I$  при напряжении  $U$  и  $\cos \varphi = 0$ .

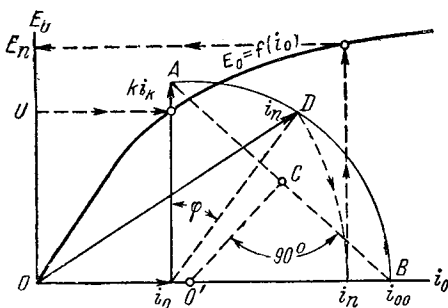


Рис. 3-23. Диаграмма, рекомендованная шведскими нормами.

Из конца вектора  $i_0$  перпендикулярно к нему откладывается вектор  $k i_k$ , представляющий ток возбуждения  $i_k$  при коротком замыкании с данным током  $I$ , увеличенный в  $k$  раз. Конец этого вектора (точка  $A$ ) соединяется с концом вектора  $i_{00}$  (точка  $B$ ) отрезком прямой, из

середины которого  $C$  восстанавливается перпендикуляр до пересечения с вектором  $i_{00}$  в точке  $O'$ . Окружность, проведенная радиусом  $\overline{O'A}$  из точки  $O'$ , является геометрическим местом концов векторов токов возбуждения при неизменных напряжении  $U$  и токе  $I$ , но изменяющемся  $\cos \varphi$ . Для нахождения тока возбуждения при заданном значении  $\cos \varphi$ , под углом  $\varphi$  к вектору  $ki_k$  проводится луч до пересечения с окружностью в точке  $D$ ; тогда вектор  $\overline{OD}$  будет представлять искомый ток возбуждения  $i_n$ .

Для машин союзного изготовления удовлетворительные результаты получаются обычно при  $k \approx 1,1$ .

Эта диаграмма может быть применена и к машинам с неявновыраженными полюсами, но в этом случае ток  $i_k$  не умножается на  $k$ , а откладывается непосредственно.

Если опыт нагрузки при  $\cos \varphi = 0$  произвести не удастся, ток возбуждения  $i_n$  для машин с явновыраженными полюсами можно определять приближенно по формулам:

$$\begin{aligned} \text{при } \cos \varphi = 1,0 \quad i_n &= \sqrt{(ki_k)^2 + i_0^2}; \\ \text{„ } \cos \varphi = 0,9 \quad i_n &\approx i_k + i_0; \\ \text{„ } \cos \varphi = 0,8 \quad i_n &\approx ki_k + i_0. \end{aligned}$$

Когда полный ток возбуждения  $i_n$  найден, то по характеристике холостого хода может быть определена соответствующая ему э. д. с. якоря  $E_n$ ; такую величину будет иметь установившееся напряжение на зажимах якоря после отключения данной нагрузки при неизменных токе возбуждения и скорости вращения.

Изменением напряжения  $\Delta U$  называется выраженное в процентах отношение разности между напряжением  $E_n$  установившимся после отключения нагрузки, и напряжением  $U$  при нагрузке, к этому последнему:

$$\Delta U = 100 \frac{E_n - U}{U} [\%].$$

Под номинальным изменением напряжения  $\Delta U_n$  понимается эта величина, полученная при отключении номинальной нагрузки:

$$\Delta U_n = 100 \frac{E_{nn} - U_n}{U_n} [\%].$$

Ток возбуждения и изменение напряжения могут определяться для любых режимов машины; это дает возможность построения ее характеристик.

Наиболее важной для эксплуатации машины является регулировочная характеристика, т. е. зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при неизменных: напряжении на зажимах, скорости вращения (а следовательно и частоте) и коэффициенте мощности.

На рис. 3-24 дан пример семейства регулировочных характеристик при номинальном напряжении и различных коэффициентах мощности для крупного турбогенератора; ток нагрузки выражен в процентах от номинального, а ток возбуждения —

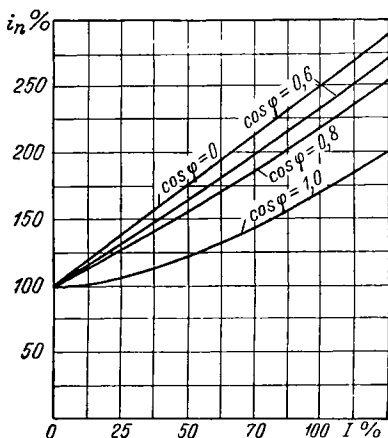


Рис. 3-24. Пример регулировочных характеристик при различных  $\cos \varphi$ .

в процентах от его значения при холостом ходе и номинальном напряжении.

Сложнее обстоит дело с построением внешней характеристики, т. е. зависимости напряжения на зажимах от тока нагрузки при неизменных: токе возбуждения, скорости вращения и коэффициенте мощности. Для этой цели сначала приходится строить ряд регулировочных характеристик при различных напряжениях на зажимах; если на каждой из них выбрать точку при интересующем токе возбуждения, например соответствующем  $2/3$  номинальной нагрузки, как показано на рис. 3-25, то абсциссы этих точек будут

являться одновременно абсциссами точек внешней характеристики, а ординатами ее будут служить величины напряжений, при которых построены регулировочные характеристики; крайними точками внешней характеристики являются точка холостого хода и точка короткого замыкания, которые могут быть взяты прямо из соответствующих характеристик.

Для синхронных машин, работающих параллельно с сетями значительной мощности, существенной является величина так называемой статической устойчивости, под которой понимается отношение максимального вращающего момента при синхронном ходе  $M_{\max}$  к номинальному вращающему моменту  $M_n$ .

Для машин с неявновыраженными полюсами, как генераторов, так и двигателей, эта величина может быть с практически достаточной точностью определена из равенства

$$\frac{M_{\max}}{M_n} \approx \frac{i_n}{i_k \cos \varphi_n} = \frac{OK3 \cdot i_n}{i_0 \cos \varphi_n},$$

где  $i_n$  — номинальный ток возбуждения;  
 $i_k$  — ток возбуждения при симметричном коротком замыкании с номинальным током в якоре;  
 $i_0$  — ток возбуждения при холостом ходе с номинальным напряжением;  
 $\cos \varphi_n$  — номинальный коэффициент мощности.

Для машин с явно выраженными полюсами достаточно правильное значение может быть получено из равенства

$$\frac{M_{\max}}{M_n} \approx \sqrt{1 + \left( \frac{i_0}{i_k \cos \varphi_n} + \operatorname{tg} \varphi_n \right)^2}.$$

Согласно ГОСТ 183-55, п. 12, для синхронных двигателей с номинальным коэффициентом мощности 0,9 (при опережающем токе) отношение максимального вращающего момента к номинальному при номинальных значениях напряжения сети, частоты и тока возбуждения и при соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы, должно быть не ниже 1,65.

Что касается синхронных генераторов, то из них нормированное значение минимальной статической устойчивости существует только для двухполюсных паротурбинных генераторов, для которых, согласно ГОСТ 533-51, п. 5, оно должно быть не ниже 1,7.

Следует отметить, что этот стандарт распространяется на турбогенераторы с воздушным и водородным охлаждением мощностью только до 100 000 кВт включительно. Для более крупных турбогенераторов, имеющих форсированное охлаждение обмоток статора и ротора, позволяющее весьма значительно повысить плотности тока в этих обмотках, ОКЗ получается настолько низким, что выдержать указанное минимальное значение статической устойчивости становится весьма трудным.

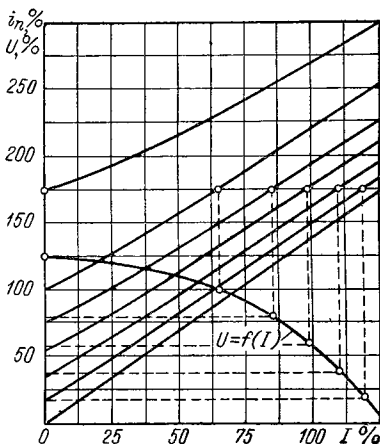


Рис. 3-25. Построение внешней характеристики по семейству регулировочных характеристик.

### 3-12. Определение коэффициента полезного действия

Крайне редко встречаются синхронные машины настолько малой мощности, чтобы их коэффициент полезного действия был ниже 50%; поэтому методы непосредственного определения

к. п. д., находящие применение при испытании небольших машин постоянного тока, лишены значения для синхронных машин.

Приспособление метода взаимной нагрузки для косвенного определения к. п. д. синхронных машин настолько трудно, что не может рассчитывать на применение. Препятствием служит необходимость поддержания на обеих машинах, соединенных друг с другом электрически и механически, номинального коэффициента мощности посредством такой конструкции, которая позволяла бы поворачивать ротор одной машины по отношению к ротору другой на произвольный угол.

Поэтому единственно употребительным для синхронных машин является метод отдельных потерь; для его применения нужны следующие данные:

- 1) сопротивления обмоток якоря и индуктора;
- 2) потери холостого хода;
- 3) добавочные потери короткого замыкания;
- 4) ток возбуждения при нагрузке.

1. Потери холостого хода  $P_0$  в синхронных машинах, согласно ГОСТ 183-55, п. 43, в отличие от машин постоянного тока, берутся для величины напряжения на зажимах без каких-либо поправок на падение напряжения в обмотке якоря.

2. Основные потери в обмотке якоря  $P_m$  (п. 44) вычисляются по измеренной величине сопротивления одной фазы обмотки, приведенного к  $75^\circ\text{C}$ , как произведение его на квадрат фазового тока и число фаз  $m$ :

$$P_m = m I^2 r_{75}.$$

3. Потери на возбуждение  $P_v$  (п. 46) определяются как произведение квадрата тока возбуждения при данной нагрузке на сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к  $75^\circ\text{C}$ . Это относится как к случаю возбуждения от собственного возбудителя, так и к случаю возбуждения от независимого источника.

При прямом исполнении к потерям возбуждения нужно добавить потери в переходном контакте щеток, которые (п. 45) берутся как произведение тока возбуждения на падение напряжения в переходном контакте щеток на кольцах в соответствии с применяемым родом щеток (см. § 2-18).

Если возбуждение подается от независимого источника, потери в этом последнем не учитываются; но если машина имеет пристроенный возбудитель, то сумма определенных выше потерь на возбуждение и потерь в переходном контакте щеток должна быть разделена на электрический к. п. д. возбудителя, определяемый отдельно.

Стандарт предписывает относить механические потери в возбудителе в счет общих механических потерь машины, все же остальные его потери определяются так, как это было описано для машин постоянного тока в § 2-18.

4. Добавочные потери  $P_d$  (п. 47) определяются из опыта короткого замыкания; однако для машин до 100 *кв*а включительно допускается приближенный учет добавочных потерь в размере 0,5% от полезной мощности — для генераторов и от подводимой мощности — для двигателей. Для нагрузок, отличных от номинальной, добавочные потери пересчитываются пропорционально квадрату тока нагрузки.

5. Если машина имеет обращенное исполнение, то нужно учесть потери в переходном контакте щеток  $P_{щ}$  на контактных кольцах якоря; они берутся как произведение тока нагрузки на переходное падение напряжения и на число колец; при симметричных многофазных системах с нейтралью, выведенной на особое контактное кольцо, последнее считается ненагруженным и в счет не принимается.

Потери в вентиляторах, масляных и водяных насосах и т. д., имеющих отдельные приводы, при определении коэффициента полезного действия не учитываются.

Синхронные компенсаторы активной мощности не отдают; поэтому понятие о коэффициенте полезного действия для них неуместно. Но для оценки экономичности работы компенсатора следует производить подсчет суммы потерь в нем согласно приведенным выше правилам, а для сравнения друг с другом компенсаторов различной мощности можно вводить понятие об относительной величине этой суммы, выражая ее в процентах от полной (кажущейся) мощности компенсатора. Потери в синхронных компенсаторах с воздушным охлаждением мощностью от 5000 до 30 000 *кв*а нормированы в ГОСТ 609-54, п. 2.

В синхронных машинах чаще, чем во всяких иных, возникают затруднения при определении механических потерь. Согласно ГОСТ 183-55, п. 38, к механическим потерям электрической машины относятся потери только в тех подшипниках, которые поставляются с машиной. Многие синхронные машины, главным образом тихоходные, предназначенные для сопряжения с поршневыми машинами, поставляются с одним подшипником, а в отдельных случаях — и вовсе без подшипников. При испытании такие машины снабжаются временными подшипниками, потери в которых, естественно, учитываются при измерении потерь холостого хода; очевидно, что для вычисления к. п. д. эти потери должны быть исключены, следовательно они должны быть измерены отдельно, например калориметрическим способом (см. § 1-18) при проточной смазке или путем измерения потерь при вращении макета вала тарированным двигателем.

Калориметрический способ может быть применен для опре-

деления потерь всех видов, если машина имеет такую систему охлаждения, при которой может быть измерен расход либо охлаждающего газа (воздуха, водорода), либо воды, применяемой для охлаждения этого газа.

Производя опыты нагревания в режимах холостого хода невозбужденной машины, холостого хода машины, возбужденной до номинального напряжения при номинальной частоте, и короткого замыкания машины при номинальном токе, и измеряя в каждом из этих опытов расход охлаждающего агента и повышение его температуры при проходе через машину после полного установления ее теплового состояния, можно, пользуясь соображениями, изложенными в § 1-18, определить в каждом опыте ту часть потерь, которая уносится в виде тепла охлаждающим агентом.

Достоинством этого способа является то, что, во-первых, он не требует сложных приготовлений, а во-вторых, допускает измерение суммы потерь, уносимых охлаждающим агентом не только в перечисленных выше опытах, но и во время работы машины на промышленную нагрузку; благодаря этому калориметрический способ измерения потерь находит широкое применение при испытаниях крупных синхронных машин как на заводских испытательных станциях, так и, в особенности, на местах установок.

Недостатком же его является невысокая точность, притом трудно поддающаяся оценке, по причине как неточности измерения расходов и перепадов температуры охлаждающих агентов, так и неучитываемых потерь тепла в окружающую среду за счет излучения, теплопередачи окружающим предметам и утечек, главным образом воздуха, через различные неплотности.

### 3-13. Определение потерь по методу самоторможения

В тех случаях, когда потери холостого хода или короткого замыкания не могут быть измерены непосредственно, а степень точности калориметрического метода недостаточна, приходится прибегать к определению их на выбеге — по методу самоторможения.

Согласно указаниям ГОСТ 183-55, п. 47, для применения этого метода необходимо произвести три опыта самоторможения:

- 1) невозбужденной машины — с разомкнутой обмоткой якоря;
- 2) возбужденной машины — с разомкнутой обмоткой якоря при токе возбуждения, дающем при холостом ходе и номинальной частоте номинальное напряжение на зажимах машины;
- 3) возбужденной машины — с замкнутой накоротко обмот-

кой якоря при токе возбуждения, дающем в якоре номинальный ток.

Кроме того, машина должна быть пущена в режиме ненагруженного двигателя при номинальном напряжении и наименьшем токе, т. е. при  $\cos \varphi = 1$ , на предмет измерения потерь холостого хода — суммы механических потерь и потерь в стали якоря.

Во всех опытах возбуждение должно быть подано от независимого источника, чтобы потери на него не учитывались опытом.

Чем больше потери, тем сильнее тормозится машина на выбеге, когда энергия потерь покрывается за счет кинетической энергии вращающегося ротора, зависящей от его скорости вращения в данный момент.

Так как обычно интерес представляют только потери при номинальной скорости вращения, то в каждом из указанных трех опытов достаточно определить отрицательное ускорение затормаживающегося ротора в тот момент, когда его скорость вращения равна номинальной; абсолютная величина этого ускорения пропорциональна искомым потерям.

Таким образом, можно написать ряд уравнений:

$$\begin{aligned} \left| \frac{dn}{dt} \right|_1 &= kP_{\tau}; \\ \left| \frac{dn}{dt} \right|_2 &= k(P_{\tau} + P_{ст}); \\ \left| \frac{dn}{dt} \right|_3 &= k(P_{\tau} + P_{м} + P_{л}); \end{aligned}$$

здесь сумма  $(P_{\tau} + P_{ст})$  становится известной из опыта холостого хода в режиме двигателя при  $\cos \varphi = 1$ , а потери в обмотке якоря  $P_{м}$  определяются подсчетом на основании измерения сопротивления обмотки непосредственно по окончании опыта,

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \frac{P_{\tau} + P_{м} + P_{л}}{P_{\tau} + P_{ст}} &= \frac{\left| \frac{dn}{dt} \right|_3}{\left| \frac{dn}{dt} \right|_2}; \\ \frac{P_{\tau}}{P_{\tau} + P_{ст}} &= \frac{\left| \frac{dn}{dt} \right|_1}{\left| \frac{dn}{dt} \right|_2}. \end{aligned}$$

Из первого уравнения можно вычесть второе:

$$\frac{P_{м} + P_{л}}{P_{\tau} + P_{ст}} = \frac{\left| \frac{dn}{dt} \right|_3 - \left| \frac{dn}{dt} \right|_1}{\left| \frac{dn}{dt} \right|_2};$$



отсюда окончательно:

$$P_d = \frac{\left| \frac{dn}{dt} \right|_3 - \left| \frac{dn}{dt} \right|_1}{\left| \frac{dn}{dt} \right|_2} (P_T + P_{CT}) - P_m;$$

$$P_T = \frac{\left| \frac{dn}{dt} \right|_1}{\left| \frac{dn}{dt} \right|_2} (P_T + P_{CT});$$

$$P_{CT} = (P_T + P_{CT}) - P_T.$$

Несмотря на принципиальную простоту метода, применение его сталкивается с затруднением, состоящим в том, что если опыты самоторможения производятся над генератором, сопряженным с первичным двигателем, то в счет механических потерь  $P_T$  входят потери не только в испытываемом генераторе, но и в первичном двигателе. Это затруднение может быть обойдено, если представляется возможность произвести два опыта холостого хода в режиме двигателя при  $\cos \varphi = 1$ : вместе с первичным двигателем и без него, что позволяет отдельно оценить механические потери в испытываемой машине.

Однако это не всегда удается по следующим причинам:

1. Если первичным двигателем является водяная турбина с вертикальным валом, то разъединение валов представляет трудоемкую операцию, на которую эксплуатирующие организации обычно соглашаются крайне неохотно; отсоединенное рабочее колесо турбины должно быть опущено и подвешено в таком положении, чтобы между фланцами валов турбины и генератора образовался зазор, достаточный для свободного вращения ротора генератора; при некоторых же конструкциях генераторов, когда вал генератора имеет только один направляющий подшипник, или когда подпятник укреплен на крышке турбины, — вращение генератора при разъединенных валах вообще невозможно.

2. Если первичным двигателем является паровая турбина, то при эластичном сопряжении валов генератора и турбины отсоединение последней не представляет особых затруднений; но если сопряжение валов жесткое, то затруднение возникает не в самой операции разъединения, а в том, что ротор генератора устанавливается с уклоном в сторону турбины. Предоставленный самому себе, он будет стремиться набегать на подшипник со стороны турбины, что вызывает опасность задираания торца вкладыша; выравнивание же ротора в горизонтальном положении нарушает центровку валов и потому обычно нежелательно.

Одним из наиболее приемлемых решений является замена одного из вкладышей временным вкладышем специальной конструкции, служащим в качестве упорного.

3. Если первичным двигателем является поршневая машина (паровая или внутреннего сгорания), то в большинстве случаев непосредственного сопряжения нельзя отсоединить генератор, потому что он имеет только один собственный подшипник или даже вовсе не имеет подшипников, и ротор насажен наглухо на выступающий конец вала двигателя взамен маховика или рядом с последним. В качестве компромиссного решения можно произвести снятие шатунов всех цилиндров и отсоединение всех вспомогательных механизмов — клапанных распределений, золотников, топливных насосов и т. д. с тем, чтобы коленчатый вал свободно вращался в подшипниках; тогда потери в подшипниках, не входящих в конструкцию генератора, могут быть оценены по согласованию между поставщиками электрической и механической частей.

При горизонтальном расположении цилиндров такая операция не представляет особых затруднений, но при вертикальном требует почти полной разборки двигателя.

4. При любом первичном двигателе пуск испытываемой машины в режиме двигателя может оказаться невозможным, например, из-за отсутствия подходящего свободного генератора; это обстоятельство во многих случаях заставляет отказаться от проведения опытов самоторможения.

Если разъединение валов по тем или иным причинам оказывается невозможным, приходится обращаться к различным косвенным способам разделения механических потерь между генератором и первичным двигателем. Эти способы распадаются на две группы:

- 1) определение механических потерь в первичном двигателе;
- 2) определение механических потерь в испытываемом генераторе.

Первая группа характерна для гидротурбинных агрегатов, в которых механические потери в турбине слагаются из двух частей:

а) потери на трение рабочего колеса турбины о воздух при осушенной полости турбины. Эти потери обычно подсчитываются по эмпирическим формулам, согласуемым поставщиками генератора и турбины. При этом крайне важно, во-первых, устранить полностью просачивание воды через направляющий аппарат турбины и, во-вторых, позаботиться о возможно большем понижении уровня воды во всасывающей трубе турбины, так как воздушный вихрь, создаваемый вращающимся рабочим колесом турбины, может присасывать воду, стоящую слишком высоко, что создает удары в турбине. Для отжимания воды иногда применяется подача в камеру турбины сжатого воздуха;

б) потери в трущихся поверхностях. Главное затруднение представляют не направляющие подшипники турбины, потери в которых относительно невелики, а опорные подпятники, нагру-

женные весом ротора генератора и рабочего колеса турбины. Стандарт не дает указаний о способах распределения этих потерь между генератором и турбиной и предоставляет решать данный вопрос по соглашению между заводами-поставщиками этих машин (ГОСТ 183-55, п. 38).

Одним из приемлемых способов такого распределения является следующий: потери на трение в подпятнике, измеренные при холостом ходе агрегата, например, способом, описанным в § 1-18, распределяются между генератором и турбиной пропорционально весам ротора и рабочего колеса.

Следует отметить, что этот вопрос в известной степени является отвлеченным, так как потери, как бы они ни были распределены, все равно выделяются в агрегате; поэтому он может иметь значение главным образом с точки зрения сравнения между собой различных гидрогенераторов одного и того же завода-поставщика или различных заводов.

Вторая группа характерна для паротурбинных установок, в которых подсчет потерь на трение ротора турбины крайне затруднителен, так что приходится обратиться к определению механических потерь в генераторе. Последние также состоят из вентиляционных потерь и потерь на трение в подшипниках. И те и другие могут быть с известным приближением определены методами, описанными в § 1-18.

Измеренные таким образом потери являются несколько преуменьшенными, так как в каждом случае часть потерь выносится не охлаждающей средой, а другими путями — лучеиспусканием, теплопроводностью к соседним частям машины и фундамента, конвекцией воздуха у нагретых наружных поверхностей и т. д.; однако эта часть потерь относительно невелика.

Если не представляется возможным произвести опыт холостого хода в режиме двигателя для определения масштаба потерь, то приходится видоизменять программу испытания, вводя вместо этого опыта дополнительный опыт самоторможения, при котором агрегат тормозится какими-либо потерями, поддающимися измерению. В качестве таких потерь удобно применить нагрузку возбудителя на сопротивление; коэффициент полезного действия возбудителя может быть при этом определен расчетным путем, а если возбудитель имеет два подшипника, то для определения потерь в нем можно его отсоединить от генератора и пустить в режиме двигателя от постороннего источника постоянного тока. В тех случаях, когда генератор работает в блоке с отдельным трансформатором, поддающаяся измерению нагрузка может быть создана питанием этого трансформатора от испытываемого генератора в режиме холостого хода при номинальном напряжении или в режиме короткого замыкания на стороне высшего напряжения при номинальном токе генератора.

Составление системы уравнений применительно к тому или

иному случаю производится по приведенному выше образцу с добавлением четвертого уравнения, содержащего поддающиеся измерению потери  $P_{\text{и}}$ .

Если эти потери осуществляются нагрузкой возбудителя, то четвертое уравнение имеет вид:

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_4 = k(P_{\tau} + P_{\text{и}}).$$

При потерях, создаваемых ненагруженным трансформатором, это уравнение, если пренебречь потерями в обмотке генератора от тока холостого хода трансформатора, будет выглядеть так:

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_4 = k(P_{\tau} + P_{\text{ст}} + P_{\text{и}}).$$

Наконец, когда нагрузка осуществляется коротким замыканием на стороне высшего напряжения трансформатора, то, пренебрегая незначительными потерями в стали генератора, можно написать четвертое уравнение в виде:

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_4 = k(P_{\tau} + P_{\text{м}} + P_{\text{д}} + P_{\text{и}}).$$

Возможен, однако, и обратный случай, когда опыт холостого хода в режиме двигателя произведен так, что позволяет надежно разделить потери холостого хода на механические потери и потери в стали; тогда надобность в проведении опыта самоторможения возбужденной машины с разомкнутой обмоткой якоря отпадает и угловой коэффициент, полученный из опыта самоторможения невозбужденной машины, может служить масштабом потерь для опыта самоторможения при замкнутой накоротку обмотке якоря:

$$\frac{P_{\tau} + P_{\text{м}} + P_{\text{д}}}{P_{\tau}} = \frac{\left| \frac{dn}{dt} \right|_3}{\left| \frac{dn}{dt} \right|_1}.$$

Для определения ускорения по данным опыта применяются три метода: метод поднормали, метод хорды и метод предельной касательной.

**1. Метод поднормали.** Этот метод состоит в том, что на полученной из опыта зависимости скорости вращения от времени (рис. 3-26) через точку  $A$ , соответствующую номинальной скорости вращения, проводится нормаль  $AB$  до пересечения с осью абсцисс и из этой же точки опускается перпендикуляр  $AC$  на ось

абсцисс. Длина отрезка  $\overline{BC}$ , носящая название поднормали, пропорциональна искомому ускорению  $\frac{dn}{dt}$ .

Действительно, производная от зависимости  $n = f(t)$  равна угловому коэффициенту касательной к ее графику в данной точке; но угловые коэффициенты касательной и нормали обратны друг другу, следовательно, если угловой коэффициент нормали равен

$$\operatorname{tg} \angle ABC = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}},$$

то обратная ему величина

$$\left| \frac{dn}{dt} \right| = \frac{1}{\operatorname{tg} \angle ABC} = \operatorname{ctg} \angle ABC = \frac{\overline{BC}}{\overline{AC}}.$$

А так как отрезок  $\overline{AC}$ , представляющий номинальную скорость вращения  $n_n$ , для всех опытов самоторможения остается

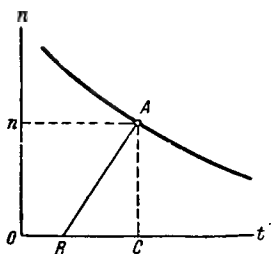


Рис. 3-26. Определение ускорения по методу поднормали.

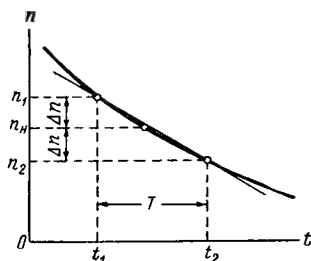


Рис. 3-27. Определение ускорения по методу хорды.

одним и тем же, вместо ускорений в уравнениях можно всюду поставить длины соответствующих им поднормалей, выраженные либо в единицах времени, либо прямо в линейных мерах, взятых с графика.

Недостатком метода поднормали является то, что проведение нормали представляет довольно неточную операцию, поскольку она является чисто графической.

**2. Метод хорды.** Этот метод, рекомендованный ГОСТ 183-55, п. 47, состоит в том, что вместо углового коэффициента касательной к кривой самоторможения в точке с ординатой  $n_n$  определяется весьма близкий к нему угловой коэффициент хорды этой кривой, проходящей через точки с ординатами  $n_1 = n_n + \Delta n$  и  $n_2 = n_n - \Delta n$ , где  $\Delta n$  представляет небольшое отклонение скорости вращения от номинальной (рис. 3-27). Если абсциссы этих точек обозначить соответственно через  $t_1$  и  $t_2$ , то

искомый угловой коэффициент будет равен по абсолютной величине

$$\left| \frac{dn}{dt} \right| = \frac{n_1 - n_2}{t_2 - t_1} = \frac{2\Delta n}{t_2 - t_1} = \frac{k'}{T},$$

где  $T$  представляет продолжительность торможения от скорости  $n_1$  до скорости  $n_2$ .

Обозначая через  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  продолжительности торможения для опытов: без возбуждения, с возбуждением при разомкнутом якоре и с коротким замыканием при номинальном токе, можно переписать решение системы уравнений самоторможения в таком виде:

$$P_d = \left( \frac{T_2}{T_3} - \frac{T_2}{T_1} \right) (P_r + P_{cr}) - P_m;$$

$$P_r = \frac{T_2}{T_1} (P_r + P_{cr});$$

$$P_{cr} = (P_r + P_{cr}) - P_r.$$

За величину отклонения  $\Delta n$  стандартом принято 10% от номинальной скорости вращения; таким образом, под продолжительностью торможения  $T$  понимается время, необходимое для понижения скорости вращения от 1,1 до 0,9 номинальной.

**3. Метод предельной касательной.** Этот метод представляет развитие метода хорды. Он состоит в том, что отклонению  $\Delta n$  скорости вращения от номинальной последовательно придаются значения, уменьшающиеся по определенному закону, например 2:1, т. е. 10%, 5%, 2,5%... и т. д. Для каждого такого значения производится по-предыдущему определение углового коэффициента хорды.

Если затем отложить полученные значения угловых коэффициентов в функции величины отклонений  $\Delta n$ , нетрудно будет экстраполировать эту зависимость на значение  $\Delta n = 0$  (рис. 3-28) и тем самым получить значение углового коэффициента касательной к кривой самоторможения в ее точке  $n = n_n$ , т. е. при номинальной скорости вращения.

Разновидность метода предельной касательной состоит в том, что одной из точек, через которые проводятся хорды, постоянно является точка  $n = n_n$ ; отклонения  $\Delta n$ , также убывающие по определенному закону, откладываются от нее только в одну сторону — вниз. Эта разновидность метода предельной ка-

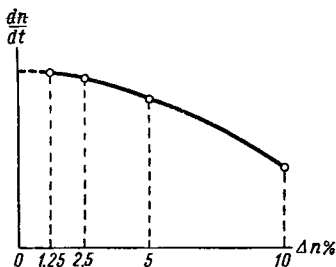


Рис. 3-28. Определение ускорения по методу предельной касательной.

сательной удобна в том случае, когда время между моментом достижения предельно допустимой скорости вращения и моментом, когда скорость вращения становится равной 1,1 номинальной, настолько мало, что нет возможности успеть произвести все необходимые операции, чтобы через скорость 1,1 номинальной машина проходила с установившимся потоком или установившимся током короткого замыкания.

### 3-14. Выполнение опытов самоторможения

Для того чтобы метод самоторможения давал правильные результаты, необходимо обращать самое серьезное внимание на точность определения отрицательного ускорения при торможении. Первым условием здесь является надежность измерения скорости вращения и времени, а также строгая координация отсчетов того и другого.

В простейшем случае скорость вращения отсчитывается по тахометру, а время — по секундомеру, причем отсчеты берутся одновременно по сигналам, подаваемым через равные промежутки времени. Обычно крупные агрегаты снабжаются стационарными тахометрами, однако точность их невысока, так что предпочтительнее пользоваться хорошо проверенными ручными тахометрами.

Более надежные результаты дает применение тахометрического генератора постоянного тока с точным вольтметром; в качестве такого генератора может быть использован возбудитель или подвозбудитель испытываемой машины, возбуждаемый от независимого источника, лучше всего от батареи аккумуляторов; перед началом опыта обмотка возбуждения должна быть прогрета до вполне установившейся температуры, после чего показания вольтметра градуируются на скорость вращения или частоту.

Можно обойтись и без возбуждения тахометрического генератора, пользуясь напряжением от остаточного намагничивания; нужно лишь, чтобы возбуждение было снято задолго до начала опытов самоторможения, так как остаточное намагничивание доходит до установившегося уровня не сразу после снятия возбуждения, а с некоторым запаздыванием.

Для повышения точности отсчетов по вольтметру можно рекомендовать компенсирование значительной части напряжения тахометрического генератора батареей аккумуляторов или сухих элементов. Если применяется вольтметр с обычной шкалой, то напряжение батареи достаточно иметь не выше 80—85% напряжения тахометрического генератора при номинальной скорости вращения испытываемой машины, а предел измерения вольтметра должен быть взят порядка 30—40% этого напряжения. Если же вольтметр имеет шкалу с нулем в середине, то напряжение батареи лучше всего иметь равным напряжению тахометриче-

ского генератора, а предел измерения вольтметра на каждой половине шкалы может быть порядка 15—20% этого напряжения. Таким образом, в обоих случаях точность отсчетов может быть повышена примерно в 2,5—3 раза.

В тихоходных гидрогенераторах с вертикальным валом, в особенности при зонтичном исполнении, якорь возбuditеля или подвозбудителя зачастую имеет значительное биение, результатом которого является пульсация напряжения с частотой вращения. Эта пульсация может совершенно не допустить применение возбuditеля или подвозбудителя в качестве тахометрического генератора; тогда в качестве такового должна быть применена небольшая быстроходная машина постоянного тока, приводимая ременной передачей от вала испытываемого генератора и надежно закрепленная в вертикальном положении. Очень важно, чтобы ремень не имел ощутимой сшивки, так как последняя тоже может служить причиной пульсации напряжения.

В наиболее ответственных случаях рекомендуется применять фотографический метод записи; камера располагается над вольтметром, объективом вниз, строго над осью вращения подвижной системы вольтметра для исключения параллакса стрелки; самое лучшее, если секундомер будет положен на вольтметр прямо над осью вращения подвижной системы (рис. 3-29). Так как при этом расстояния от объектива до шкалы вольтметра и до циферблата секундомера неодинаковы, для получения достаточной резкости снимков желательно применять диафрагмирование объектива, следовательно, необходимо обеспечить сильное освещение шкал, подобрав его так, чтобы можно было производить снимки с достаточно большой скоростью экспозиции ( $1/250$  —  $1/500$  сек). На рис. 3-30 дан пример кадра записи.

Для того чтобы обеспечить надежное проведение опыта, следует начать его от скорости вращения, превышающей номинальную не менее чем на 15%. В быстроходных машинах нельзя сколько-нибудь существенно выходить за пределы этого повышения, поскольку прочность ротора испытывается повышением

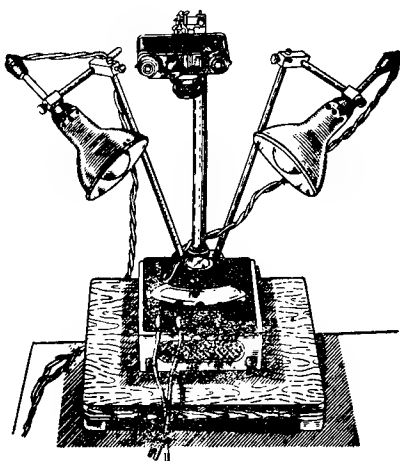


Рис. 3-29. Установка для фотографической записи кривой самоторможения.



скорости вращения всего лишь на 20% сверх номинальной. Иначе обстоит дело в гидрогенераторах, у которых безопасное повышение скорости вращения возможно в гораздо более широких пределах; однако следует учесть, что при слишком больших ее повышениях может происходить быстрое возрастание температуры трущихся опорных поверхностей, вследствие которого сильно изменяются потери на трение. Для того чтобы опыты самоторможения дали правильные результаты, крайне важно, чтобы температура трущихся частей была вполне установившейся и притом нормальной

для эксплуатации; повышение скорости вращения следует производить быстро и в самый последний момент перед опытом, который должен начинаться немедленно по достижении заданной скорости.

Порядок проведения опытов самоторможения зависит от того, каким способом машина приводится во вращение. Если испытание производится с разъединением валов, то единственный способ приведения во вращение испытываемой машины — это пуск ее в режиме двигателя от отдельного генератора, частота которого может быть повышена. Возбуждение испытываемой машины

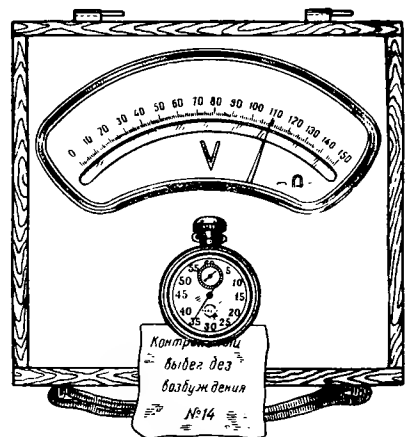


Рис. 3-30. Пример кадра фотографической записи напряжения тахогенератора и времени.

безусловно должно быть подано от независимого источника, например от резервного возбуждательного агрегата, в большинстве случаев имеющегося на станции. Желательно, чтобы возбуждение вспомогательного генератора, применяемого в качестве источника питания, тоже было подано от независимого возбуждательного агрегата; однако можно обойтись и собственным возбудителем вспомогательного генератора, хотя это значительно менее удобно: при изменениях скорости вращения вспомогательного генератора требуется специальное наблюдение за его возбуждением, для облегчения которого целесообразно подать возбудителю вспомогательного генератора возбуждение от независимого источника, например от батареи аккумуляторов или от зарядного агрегата, и обеспечить возможность достаточно широкого регулирования этого возбуждения.

Наличие двух независимых возбуждательных агрегатов облег-

чает и первоначальный пуск, позволяя произвести его синхронным способом, и все последующие операции, поскольку при этом возбуждение вспомогательного генератора не зависит от скорости вращения последнего и за ним не требуется специального наблюдения. При одном независимом возбуждательном агрегате синхронный пуск возможен, если на время пуска соединить роторы обеих машин последовательно, или же первый пуск должен быть произведен асинхронным способом, если только испытываемая машина это допускает.

Когда обе машины — вспомогательная и испытываемая — так или иначе приведены во вращение, скорость вращения устанавливается на уровне номинальной и выдерживается до полного установления температуры трущихся частей. После установления этой температуры, на что может потребоваться несколько часов, производится быстрый подъем скорости вращения до допустимого предела и немедленно начинается опыт самоторможения.

Опыт самоторможения невозбужденной машины требует только отключения ее от вспомогательной с одновременным снятием возбуждения. Отсчеты могут быть начаты, как только ток возбуждения полностью затух в гасительном сопротивлении, что требует лишь нескольких секунд; еще быстрее работают автоматы гашения поля с дугогасительными камерами специального типа, действующие без гасительных сопротивлений.

Пока длится опыт самоторможения, скорость вращения вспомогательного генератора снижается до 80—85% номинальной, с него снимается возбуждение и на этой скорости он продолжает вращаться до тех пор, пока скорость вращения испытываемой машины также не подойдет к этому пределу.

Тогда испытываемая машина вновь подключается к вспомогательному генератору и совместной подачей возбуждения они втягиваются в синхронизм, после чего опыт повторяется снова таким же порядком.

При опыте самоторможения возбужденной машины с разомкнутой обмоткой якоря перед подъемом скорости вращения выше номинальной устанавливается ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению при номинальной частоте. Опыт начинается отключением испытываемой машины от вспомогательного генератора, после чего немедленно могут быть начаты отсчеты.

По окончании опыта, когда скорость вращения испытываемой машины упала ниже 90% номинальной, возбуждение с нее снимается и затем производится втягивание ее в синхронизм уже описанным способом.

Наибольшей сложности достигают операции при опыте самоторможения машины с замкнутой накоротко обмоткой якоря. Немедленно после отключения испытываемой машины от вспомогательного генератора нужно снять с нее возбуждение, замк-

нуть обмотку якоря накоротко, вновь подать возбуждение и установить в обмотке якоря номинальный ток. Все это необходимо успеть сделать прежде чем скорость вращения упадет до 110% номинальной, что требует очень слаженной работы всего участвующего персонала.

По окончании опыта следует сначала снять возбуждение, затем разомкнуть обмотку якоря и уже после этого приступить к втягиванию машины в синхронизм; но эти операции уже не требуют такой быстроты исполнения, как при начале опыта.

Совершенно ясно, что при столь поспешных операциях не все проходит гладко, вследствие чего каждый опыт требует неоднократного повторения; целесообразно вести все опыты без перерыва, имея неустанный надзор за постоянством температуры трущихся частей и поддерживая ее с точностью до  $\pm 1^\circ \text{C}$  на уровне, наблюдаемом при нормальной эксплуатации машины.

Такого же порядка нужно придерживаться и в том случае, когда опыты самоторможения проводятся без разъединения валов, но с вращением испытываемой машины в режиме двигателя.

Значительно проще происходит дело тогда, когда вращение испытываемой машины может производиться ее первичным двигателем, потому что в этом случае необходимый режим может быть установлен на машине еще до начала повышения скорости вращения сверх номинальной.

И здесь необходимо возбуждение от независимого источника, но никаких операций в электрической части во время опыта производить не требуется; все заботы переносятся на первичный двигатель.

В гидросиловых установках проведение опытов таким способом возможно в случае, когда первичным двигателем служит турбина активного типа, и то лишь при условии, что ее сопла могут быть быстро и вполне надежно закрыты, а уровень воды во всасывающей трубе настолько низок, что рабочее колесо турбины не может ее подхватывать. В турбинах реактивных типов соблюдение этих условий сомнительно.

В паротурбинных установках проведение опыта возможно; важно лишь следить, чтобы в цилиндре низкого давления турбины все время поддерживался очень глубокий вакуум, так как в противном случае потери на трение ротора цилиндра низкого давления, возрастающие по мере повышения абсолютного давления в этом цилиндре, способны совершенно исказить результаты.

В установках с поршневыми двигателями проведение опыта с приводом от первичного двигателя невозможно.

Непосредственное определение зависимости скорости вращения от времени в процессе самоторможения не представляет единственного способа выполнения этого опыта. Наоборот, классическим способом является регистрация зависимости углового пути, совершаемого валом, от времени посредством совместного

нанесения на одну и ту же ленту точных отметок времени хронографом и сигналов, подаваемых, например, один раз за каждый оборот вала установленным на нем контактирующим устройством.

Однако хронограф является дорогостоящим и редким инструментом; поэтому целесообразно заменить его более доступными приборами. В качестве такого прибора может быть предложен обыкновенный электрический секундомер, секундная стрелка которого совершает один оборот за 50 периодов питающего его переменного тока. Это движение является настолько быстрым, что единственным способом регистрации показаний может служить только фотографический, видоизмененный следующим образом.

На валу испытываемой машины укрепляется кулачок, замыкающий один раз за каждый оборот вала неподвижные контакты, установленные поблизости от последнего. Эти контакты включают пару импульсных ламп, нашедших за последнее время широкое применение в фотографической практике, которые освещают шкалу электрического секундомера, питаемого сетевым напряжением, и производят фотографирование при предварительно открытом затворе камеры. В действительности нет надобности в фотографировании при каждом обороте вала даже для медленно вращающихся валов гидрогенераторов; вполне достаточно производить его один раз за несколько оборотов, например, пять или десять, что можно сделать при помощи несложного приспособления.

Если обозначить через  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и т. д. последовательно зарегистрированные показания секундомера, между каждыми двумя из которых вал совершил  $N$  полных оборотов, то средние скорости вращения за промежутки времени между ними будут:

$$\bar{n}_{1,2} = \frac{60N}{t_2 - t_1}, \quad \bar{n}_{2,3} = \frac{60N}{t_3 - t_2}$$

и т. д., а ускорение торможения, например, в момент времени  $t_2$

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_2 \approx \frac{2(\bar{n}_{1,2} - \bar{n}_{2,3})}{t_3 - t_1}.$$

Строя зависимость ускорения от скорости вращения, остается определить его значение при номинальной скорости вращения.

Частота в современных крупных энергетических системах обычно весьма стабильна, но если возникает сомнение в ее устойчивости, то в кадр может быть включен стрелочный частотомер хорошего класса точности, по показаниям которого исправляются отсчеты времени. Другим способом проверки показаний электрического секундомера является включение в кадр обычного секундомера или просто часов с секундной стрелкой.

Указанный способ выполнения опыта самоторможения весьма прост, почти не нуждается в графических построениях и наряду со всем этим отличается весьма высокой степенью точности. Кроме того, кулачок на валу подает сигнал всегда в момент прохождения вала через одно и то же положение, чем устраняется ошибка от возможной неравномерности изменения скорости на протяжении каждого оборота.

Для быстровращающихся машин, как турбогенераторы и т. п., этот способ менее пригоден и во всяком случае требует применения специальных приспособлений для автоматического выбора момента подачи сигнала на импульсные лампы; но как раз эти машины менее нуждаются в его применении.

### 3-15. Испытание на нагревание непосредственной нагрузкой

Взаимная нагрузка синхронных машин в принципе хотя и возможна, но сопряжена со столь значительными трудностями осуществления, что применение ее доступно практически только для машин ограниченных мощностей.

Немногом более высокий предел может быть принят и для возвратной работы синхронных машин. Поэтому для более крупных машин почти единственным способом непосредственной нагрузки служит работа на промышленную нагрузку с приводом от первичного двигателя.

Характерным для работы на промышленную нагрузку является затруднение с поддержанием заданного напряжения, в особенности когда испытываемая машина работает параллельно с крупной энергетической системой, напряжение которой в течение суток регулируется по определенному графику. Так как изменение напряжения во время испытания на нагревание не должно допускаться, для проведения испытания следует выбирать такое время суток, в течение которого изменение напряжения системы не предвидится.

Для крупных машин, работающих в блоке с трансформаторами, приспособление к напряжению системы должно производиться путем подбора таких дополнительных отводов обмотки высшего напряжения трансформатора, которые позволяли бы иметь на испытываемой машине заданное напряжение режима испытания, например номинальное, и в то же время держать при данной нагрузке на стороне высшего напряжения трансформатора то напряжение, которое задано режимом системы. Режим прочих генераторов той же станции должен при этом быть таким, чтобы обеспечивать испытываемому генератору неизменность активной нагрузки и коэффициента мощности.

На гидростанциях иногда оказывается возможным проводить испытание на нагревание при нагрузке генератора на водяной реостат. Такие реостаты были предусмотрены при постройке некоторых гидростанций в виде капитальных сооружений,

имеющих задачей настройку регуляторов турбин путем сбросов и набросов нагрузки, но они могут быть при сравнительно ограниченных затратах выполнены и как временные устройства, погруженные прямо в воду реки на достаточно глубоком месте. Место погружения должно выбираться вдали от судоходных фарватеров, шлюзов и рыбоходов, защищаться от плывущего мусора, главным образом от древесных остатков, и огораживаться предупредительными сигналами.

Преимущество работы на водяной реостат состоит в полной свободе выбора величины напряжения и совершенно спокойной нагрузке; но крупным недостатком ее является необходимость параллельного подключения еще одного генератора для создания реактивной нагрузки, камера турбины которого должна быть освобождена от воды.

Преимущества работы на реостат особенно ощутимы при снятии характеристик генератора — регулировочной, внешней, V-образной и т. д.; при работе крупного генератора на промышленную нагрузку в процессе снятия регулировочной или V-образной характеристики приходится неоднократно отключать блок от системы для переключения дополнительных выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, что сильно затягивает снятие характеристики; а снятие внешней характеристики вообще невозможно. Между тем при работе на водяной реостат все эти затруднения отпадают.

Каким бы способом ни осуществлялась нагрузка, при установлении ее режима следует всегда сначала устанавливать необходимую активную мощность, а затем уже переходить к установлению потребной реактивной мощности; нарушение этого правила ведет только к напрасной потере времени при настройке режима испытания.

При испытании синхронных машин на нагревание применяются все методы измерения температуры, предусмотренные стандартом: метод сопротивления — для обмотки индуктора; метод заложенных температурных детекторов — для обмотки и стали якоря; метод встраиваемых температурных детекторов — для любых неподвижных частей машины, как активных (кроме лобовых частей обмоток высокого напряжения), так и конструктивных, а также для масла, воды и охлаждающей среды; и, наконец, метод термометра — главным образом для измерения температуры жидкостей и газов.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 21, заложенные температурные детекторы должны применяться для измерения температуры обмоток статоров (якорей) синхронных машин мощностью 5000 *кв*а и более или, независимо от мощности, с длиной сердечника 1 м и более; а согласно п. 50 этого же стандарта количество таких температурных детекторов должно быть не менее шести.

Однако ГОСТ 533-51 предусматривает укладку заложенных

температурных детекторов в турбогенераторах всех охватываемых им мощностей, а ГОСТ 5616 — в гидрогенераторах мощностью от 500 *кв*а и выше. При этом количество заложенных температурных детекторов в наиболее крупных машинах обычно значительно превосходит указанный выше минимум.

Было бы весьма затруднительно дать какие-либо общие указания в отношении установки температурных детекторов, встраиваемых только на время испытания на нагревание для измерения температуры активных или конструктивных частей машины; естественно, что чем больше их количество, тем полнее будет испытание, но и тем труднее его выполнение. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо критически оценить минимальное необходимое количество точек измерения температуры и наиболее удобные для этого методы, чтобы не обременять персонал, проводящий испытание, выполнением бесполезных измерений.

Напротив, в отношении измерения температуры жидкостей и газов можно дать достаточно определенные указания. Испытание на нагревание машин с протяжной вентиляцией, а тем более с замкнутым циклом вентиляции, лишено всякого смысла, если в нем отсутствуют сведения о температуре охлаждающей среды (воздуха или водорода), а по возможности и об ее расходе через машину. Последний при замкнутом цикле вентиляции весьма нелегко поддается определению, но это может быть в достаточной степени возмещено измерением температуры и расхода охлаждающей воды, как было показано в § 1-18.

Движение охлаждающей среды вне машины происходит в каналах, поперечные размеры которых соизмеримы с их длинами; поэтому распределение скоростей по поперечным сечениям может быть весьма неравномерным, а вместе с ним неравномерно и распределение температуры охлаждающей среды по сечению канала. Отсюда следует, что измерение температуры охлаждающей среды сразу по выходе из охладителя может дать неверные результаты, если оно не производится достаточным количеством измерителей, разбросанных по сечению канала; но количество измерителей температуры может быть значительно уменьшено, если они располагаются как можно дальше от охладителей, непосредственно при входе в машину, где вследствие энергичного перемешивания струй температура охлаждающей среды уже выравнивается.

Перепад температуры охлаждающей среды на охладителе достаточно велик, и потому для его измерения нет надобности в применении измерителей повышенной точности; но перепад температуры охлаждающей воды ограничивается немногими градусами и требует особой тщательности измерения.

Величина расхода охлаждающей воды при испытании на нагревание не играет существенной роли. Действительно, охла-

дители обычно строятся так, что при расчетном расходе охлаждающей воды перепад температуры последней очень мал. Пусть, например, он составляет  $1^{\circ}\text{C}$ , а температура входящей воды равна  $+25^{\circ}\text{C}$ ; это значит, что средняя температура воды в охладителе равна  $25,5^{\circ}\text{C}$ . Если расход воды уменьшить вдвое, то во столько же раз возрастет перепад ее температуры, а средняя температура воды в охладителе станет  $26^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, средняя температура воды возросла всего лишь на  $0,5^{\circ}\text{C}$ ; на столько же возрастет и средняя температура охлаждающего газа, что представляет ничтожную величину, лежащую на пределе точности измерения температуры охлаждающей среды.

По условиям режима энергетической системы не всегда удастся производить испытание на нагревание точно при номинальном режиме. Когда номинальная нагрузка не может быть достигнута по причинам, от испытываемой машины не зависящим, производится несколько испытаний на нагревание при разных нагрузках, но по возможности при одном и том же напряжении и коэффициенте мощности. Полученные значения превышений температуры обмоток индуктора и якоря и т. п. откладываются

в зависимости от квадратов соответствующих токов; при достаточно тщательно проведенных испытаниях через полученные точки можно провести прямые, по которым затем интерполяцией, а если нужно, то и экстраполяцией, определить превышения температуры этих частей (рис. 3-31).

Испытание на нагревание машин с водородным охлаждением может производиться при заполнении машины как водородом, так и воздухом. Полученные результаты не могут служить для взаимного контроля, так как условия охлаждения различных частей машины разными газами неодинаковы. При этом следует иметь в виду, что испытание на нагревание не должно производиться сразу после замены воздуха водородом или наоборот, потому что превышения температуры сильно зависят не только от того, каким газом заполнена полость машины, но и от того, какой газ содержится во всевозможных пустотах, неизбежно заключенных в толще изоляции, так как этим определяется ее теплопроводность. Нужен достаточно большой промежуток времени, чтобы из таких пустот были удалены остатки газа, предшествовавшего данному. Этому процессу помогает эксплуатация машины с перемежающейся нагрузкой, потому что периодически

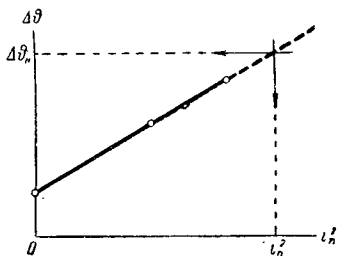


Рис. 3-31. Определение превышений температуры обмоток при номинальном режиме.



ские повышения и понижения температуры способствуют вытеснению остатков постороннего газа из изоляции.

Опыт испытания на нагревание крупных турбогенераторов показывает, что превышения температуры, полученные немедленно после замены воздуха водородом, могут оказаться больше тех, которые определяются после достаточно длительного периода эксплуатации, на 10—15°С.

### 3-16. Испытание на нагревание косвенным методом

Для испытания на нагревание крупных машин, которые не могут быть нагружены непосредственно, приходится обращаться к косвенному методу, который состоит в том, что машина, имеющая нормальное охлаждение, поочередно подвергается нагреванию различными видами потерь, существующими в ней при номинальной нагрузке, и на основании превышений температуры, полученных в результате этих опытов, выносится суждение о превышениях температуры при работе в номинальном режиме.

Наиболее сложными в этом отношении являются машины с большими окружными скоростями ротора и интенсивной вентиляцией — турбогенераторы и турбодвигатели, а также крупные гидрогенераторы и синхронные компенсаторы, в особенности при охлаждении последних водородом.

Нагревание активных частей машины определяется следующими видами потерь:

1) основные потери в обмотке якоря и добавочные потери короткого замыкания, принимаемые пропорциональными квадрату тока якоря;

2) основные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря, а также добавочные потери на активных поверхностях стали якоря и индуктора при холостом ходе, принимаемые пропорциональными квадрату напряжения;

3) потери на возбуждение обмотки индуктора, пропорциональные квадрату тока возбуждения и сопротивлению обмотки индуктора в нагретом состоянии;

4) вентиляционные потери, т. е. потери на трение ротора об охлаждающую среду и охлаждающей среды о статор, а также на трение охлаждающей среды в вентиляторах при замкнутом цикле вентиляции, а при разомкнутом цикле — когда вентиляторы являются нагнетающими;

5) потери на трение в подшипниках, контактных кольцах и т. д., тепло от которых может частично передаваться за счет теплопроводности вала к активным частям машины.

Ни один из опытов, которые могут быть произведены, не дает возможности определить нагревание машины только одним каким-либо видом этих потерь.

1. Испытание на нагревание в режиме короткого замыкания при номинальном токе дает превышение температуры, которое

определяется полными потерями короткого замыкания, полными механическими потерями (вентиляционными и на трение в подшипниках) и пониженными потерями на возбуждение, поскольку ток возбуждения при коротком замыкании значительно меньше, чем при нагрузке.

2. Испытание на нагревание в режиме холостого хода при номинальном напряжении дает превышение температуры, определяемое полными потерями в стали якоря (как основными, так и добавочными), полными механическими потерями и пониженными потерями на возбуждение, так как и при холостом ходе ток возбуждения меньше, чем при нагрузке.

3. Испытание на нагревание в режиме холостого хода при номинальном токе возбуждения отличается от предыдущего тем, что при нем имеют место повышенные потери в стали якоря и почти полные потери на возбуждение.

4. Испытание на нагревание в режиме холостого хода без возбуждения дает превышение температуры только за счет полных механических потерь; все остальные виды потерь при нем отсутствуют.

В основу применения метода может быть положено предположение, что превышение температуры какой-нибудь части машины над температурой входящей в нее охлаждающей среды в любом режиме равно сумме превышений температуры, создаваемых каждым видом потерь в отдельности, и не зависит от температуры входящей в машину охлаждающей среды, и что сумма основных потерь в обмотке якоря и добавочных потерь не зависит от ее температуры.

Если ввести обозначения для превышения температуры данной части машины:

$\Delta\vartheta_k$  — за счет основных потерь в обмотке якоря и добавочных потерь при номинальном токе якоря  $I_n$ ;

$\Delta\vartheta_{ст}$  — за счет потерь в стали при номинальном напряжении  $U_n$ ;

$\Delta\vartheta_v$  — за счет потерь на возбуждение при номинальном токе возбуждения  $I_n$ , но при обмотке индуктора, имеющей температуру  $15^\circ \text{C}$ ;

$\Delta\vartheta_r$  — за счет механических потерь;

$\Delta\vartheta_n$  — допустимое превышение температуры обмотки индуктора при номинальном режиме;

$\vartheta_0$  — температура охлаждающей среды во время опыта, то при справедливости высказанного выше предположения превышение температуры этой части при номинальном режиме будет не более чем

$$\Delta\vartheta_n = \Delta\vartheta_k + \Delta\vartheta_{ст} + \beta\Delta\vartheta_v + \Delta\vartheta_r,$$

где

$$\beta = \frac{235 + \vartheta_0 + \Delta\vartheta_n}{250}$$



якоря, так как при нем напряжение на зажимах якоря достигает примерно той же величины, при которой производится испытание междувитковой изоляции его обмотки, а иногда и превосходит ее.

Поэтому в тех случаях, когда каждая секция обмотки якоря состоит более чем из одного витка, не следует поднимать напряжение выше 120% номинального; но при таком напряжении обычно ток возбуждения не достигает номинального значения  $i_n$ , что несколько осложняет решение системы.

Если  $U'_0$  — напряжение, которое имеется на зажимах во время этого испытания, и  $i'_0$  — соответствующий ему ток возбуждения, то уравнение для  $\Delta\vartheta_3$  получает вид:

$$\Delta\vartheta_3 = \left( \frac{U'_0}{U_n} \right)^2 \Delta\vartheta_{ст} + \left( \frac{i'_0}{i_n} \right)^2 \beta_3 \Delta\vartheta_v + \Delta\vartheta_{т.}$$

При этом испытании в машинах высокого напряжения рекомендуется размыкать нулевую точку обмотки якоря. Емкость по отношению к корпусу, распределенная по всей длине обмотки каждой фазы, будет оказывать влияние, до некоторой степени аналогичное заземлению середины каждой фазы, в результате чего наибольшее напряжение между выводами разных фаз будет точно равно половине того, которое было бы при замкнутой нулевой точке. В машинах наиболее высокого напряжения этим достигается еще и резкое уменьшение коронирования.

**Пример.** Турбогенератор с номинальным напряжением  $U_n = 10\,500$  в подвергнут испытанию на нагревание косвенным методом. Превышения температуры обмотки ротора (индуктора) оказались:

$$\Delta\vartheta_1 = 39^\circ \text{ C}; \quad \Delta\vartheta_2 = 21^\circ \text{ C}; \quad \Delta\vartheta_3 = 76^\circ \text{ C}; \quad \Delta\vartheta_4 = 8^\circ \text{ C}.$$

Требуется определить ее превышение температуры  $\Delta\vartheta_n$  при номинальном режиме, если при всех опытах  $\vartheta_0 = 24^\circ \text{ C}$ .

Ток возбуждения при коротком замыкании с номинальным током составляет  $i_k = 199$  а, при холостом ходе с номинальным напряжением  $i_0 = 160$  а, при номинальной нагрузке, согласно диаграмме,  $i_n = 370$  а, а по характеристике холостого хода этому току соответствует напряжение  $U_n = 14\,100$  в. Материалы изоляции обмотки ротора относятся к классу В, следовательно  $\beta = 1,46$ .

Система уравнений превышений температуры принимает вид:

$$39 = \Delta\vartheta_k + \left( \frac{199}{370} \right)^2 \frac{235 + 24 + 39}{250} \Delta\vartheta_v + \Delta\vartheta_{т.};$$

$$21 = \Delta\vartheta_{ст} + \left( \frac{160}{370} \right)^2 \frac{235 + 24 + 21}{250} \Delta\vartheta_v + \Delta\vartheta_{т.};$$

$$76 = \left( \frac{14\,100}{10\,500} \right)^2 \Delta\vartheta_{ст} + \frac{235 + 24 + 76}{250} \Delta\vartheta_v + \Delta\vartheta_{т.};$$

$$8 = \Delta\vartheta_{т.}$$

Подстановка значения  $\Delta\vartheta_T$  в первые три уравнения и совместное решение второго и третьего дает:

$$\Delta\vartheta_{CT} = 3,3^\circ \text{ C};$$

$$\Delta\vartheta_B = 46,3^\circ \text{ C};$$

отсюда решается первое уравнение относительно  $\Delta\vartheta_K$ :

$$\Delta\vartheta_K = 15,1^\circ \text{ C}.$$

Таким образом, искомое превышение температуры обмотки ротора при номинальной нагрузке получается равным:

$$\Delta\vartheta_H = 15,1 + 3,3 + 1,46 \cdot 46,3 + 8,0 = 93,9^\circ \text{ C}.$$

### 3-17. Испытание на нагревание в режиме компенсатора

Мощность синхронных машин, предназначенных для работы в качестве компенсаторов, большей частью настолько велика, что испытание их в этом режиме, являющемся для них нормальным, на заводе трудно осуществимо, причиной чему является обычно отсутствие приемника достаточной мощности.

Однако для относительно небольших машин, предназначенных для работы в качестве генераторов или двигателей, испытание на нагревание в режиме компенсатора может применяться как метод, до некоторой степени имитирующий номинальную нагрузку.

Количество различных режимов, которые следует применить при таком испытании, конечно, должно быть не меньше количества неизвестных, входящих в уравнение превышения температуры какой-либо части машины.

Выше, в § 3-16, было установлено, что количество таких неизвестных равно четырем, если есть необходимость в учете превышения температуры от одних только механических потерь при холостом ходе без возбуждения, и трем, если это превышение настолько невелико, что им можно пренебречь.

В рассматриваемом методе различие в режимах может быть достигнуто двумя путями: за счет изменения напряжения при одном и том же токе якоря и за счет изменения тока при одном и том же напряжении.

Нужно лишь так выбрать значения напряжений и токов, чтобы система уравнений превышений температуры решалась достаточно надежным образом.

Так, например, может быть принят следующий состав испытаний:

- 1) номинальное напряжение, наименьший ток якоря  $I_0$ ;
- 2) 70 % номинального напряжения, наименьший ток якоря  $I_n$ ;
- 3) номинальное напряжение, номинальный ток возбуждения;

4) 70 % номинального напряжения, номинальный ток якоря.

Сохраняя систему обозначений, принятую в § 3-16, можно написать уравнения для превышений температуры таким образом:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_{ст} + \left(\frac{I'_0}{I_H}\right)^2 \Delta\vartheta_k + \left(\frac{i'_0}{i_H}\right)^2 \beta_1 \Delta\vartheta_B + \Delta\vartheta_T; \quad (1)$$

$$\Delta\vartheta_2 = 0,49\Delta\vartheta_{ст} + \left(\frac{I''_0}{I_H}\right)^2 \Delta\vartheta_k + \left(\frac{i''_0}{i_H}\right)^2 \beta_2 \Delta\vartheta_B + \Delta\vartheta_T; \quad (2)$$

$$\Delta\vartheta_3 = \Delta\vartheta_{ст} + \left(\frac{I'''_0}{I_H}\right)^2 \Delta\vartheta_k + \beta_3 \Delta\vartheta_B + \Delta\vartheta_T; \quad (3)$$

$$\Delta\vartheta_4 = 0,49\Delta\vartheta_{ст} + \Delta\vartheta_k + \left(\frac{i^{IV}_0}{i_H}\right)^2 \beta_4 \Delta\vartheta_B + \Delta\vartheta_T. \quad (4)$$

Если учесть, что токи якоря  $I'_0$  и  $I''_0$  в режимах (1) и (2) настолько малы, что вызываемым ими нагреванием можно пренебречь, решение системы несколько упрощается, так как из первых двух уравнений выпадает по одному члену.

В тех случаях, когда от испытания не требуется установления влияния отдельных составляющих, можно ограничиться одним испытанием при номинальном токе якоря и номинальном токе возбуждения, следовательно при напряжении, пониженном против номинального. Для машин с явно выраженными полюсами понижение напряжения обычно составляет 10—15 % номинального напряжения, и потому обусловленное им уменьшение потерь в стали мало отражается на общем балансе потерь в машине и незначительно влияет на превышение температуры обмоток, в особенности обмотки индуктора.

Но для турбогенераторов понижение напряжения достигает не менее 25 %, что уже может заметно отразиться на превышении температуры обмотки не только якоря, но и индуктора, причем последней — главным образом за счет понижения добавочных потерь на поверхности индуктора.

Чтобы учесть влияние понижения напряжения при испытании в режиме с номинальным током якоря и номинальным током индуктора, можно к этому испытанию добавить два испытания в режиме холостого хода: при номинальном напряжении и при том напряжении, которое соответствует испытанию при номинальном токе якоря и номинальном токе индуктора. Для обмотки якоря это дает непосредственно поправку на различие потерь в стали при номинальном и при пониженном напряжении; что же касается обмотки индуктора, то для нее поправка может быть получена следующим образом: если отложить в зависимости от квадрата тока индуктора превышения ее температуры,

полученные во всех трех испытаниях, и провести прямую через точки, соответствующие испытанию в режиме с номинальным током якоря и номинальным током индуктора и испытанию в режиме холостого хода при том же напряжении, то точка, соответствующая испытанию в режиме холостого хода при номинальном напряжении, должна оказаться лежащей выше этой прямой на величину искомой поправки.

### 3-18. Определение утечки водорода

Во всякой крупной машине имеется достаточное количество стыков и швов, через неплотности которых может происходить утечка водорода; немало всяких соединений имеется и в системе питания машины водородом. Одним из наиболее обычных мест утечки являются токоподводы индуктора — соединения контактных колец с обмоткой возбуждения, которые с трудом поддаются уплотнению. Но все такие утечки могут быть устранены тщательностью изготовления и сборки машины, между тем как одна основная утечка, обусловленная конструкцией машины, остается неустранимой. Речь идет об утечке водорода через масляное уплотнение вала, в котором вспененное масло выносит из полости уплотнения значительное количество газа.

Разница между этими двумя видами утечки состоит в том, что утечка через всякого рода неплотности может считаться пропорциональной квадратному корню из избыточного давления газа внутри машины над атмосферным давлением, между тем как утечка через масляную пену в уплотнении — пропорциональной первой степени абсолютного давления газа. Поэтому повышение избыточного давления, например, с 0,05 до 0,1 *ати* должно вызвать повышение утечки через неплотности примерно на 40%, между тем как на утечке через уплотнение вала оно почти не отразится.

Определение утечки водорода производится следующим образом: в машине устанавливается требуемая величина избыточного давления газа, контролируемая по ртутному манометру, после чего питание машины водородом переводится на свежий баллон, имеющий полное давление газа.

На стороне высокого давления редукционного клапана этого баллона устанавливается проверенный манометр с достаточным пределом измерения (обычно до 150  $\text{кг/см}^2$ ). После этого, при непрерывном поддержании давления внутри машины точно на заданном уровне, через определенные промежутки времени, например через каждые 30 *мин*, ведется измерение давления в баллоне.

При правильных условиях опыта зависимость давления в бал-

лоне от времени должна представлять наклонную прямую (рис. 3-32) с отрицательным угловым коэффициентом

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{P_1 - P_2}{t_2 - t_1} \text{ [кг/см}^2 \cdot \text{час]},$$

где  $P_1$  — первоначальное давление в баллоне в момент времени  $t_1$ ;

$P_2$  — окончательное давление в момент времени  $t_2$ .

Опыт может быть доведен до минимального допустимого давления газа в баллоне (баллоны не опорожняются до конца в целях устранения необходимости промывки перед новым заполнением), но может быть прекращен и ранее этого.

Если обозначить через  $V$  объем баллона в кубических метрах, то утечка водорода  $Q$ , приведенная к давлению 760 мм рт. ст. и температуре  $0^\circ \text{C}$ , будет равна:

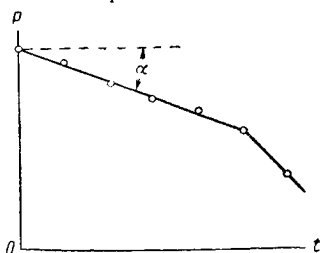


Рис. 3-32. Определение утечки водорода.

$$Q = 0,968 \frac{273}{273 + \vartheta} V \operatorname{tg} \alpha \text{ [м}^3/\text{час]},$$

где  $\vartheta$  — температура газа во время опыта.

**Пример.** Давление в баллоне при начале опыта определения утечки водорода было  $P_1 = 136 \text{ кг/см}^2$ . Опыт был прекращен, когда через время  $T = 5 \text{ час. } 30 \text{ мин.}$  давление упало до величины  $P_2 = 65 \text{ кг/см}^2$ .

Требуется определить утечку, если известно, что объем баллона  $V = 45 \text{ л} = 0,045 \text{ м}^3$ , а температура газа  $\vartheta = 24^\circ \text{C}$ .

Скорость падения давления в баллоне

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_1 - P_2}{T} = \frac{136 - 65}{5,5} = 12,9 \text{ кг/см}^2 \text{ час.}$$

Утечка водорода, приведенная к давлению 760 мм рт. ст. и температуре  $0^\circ \text{C}$ , равна:

$$Q = 0,968 \frac{273}{273 + \vartheta} V \operatorname{tg} \alpha = 0,968 \frac{273}{273 + 24} 0,045 \cdot 12,9 = 0,517 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Весьма существенно, чтобы во время проведения опыта средняя температура газа внутри машины не изменялась, так как в противном случае опыт даст неверные результаты. Количество газа внутри машины во много раз превосходит возможную часовую утечку; поэтому изменение средней температуры газа только на  $1^\circ \text{C}$  в час при неизменном избыточном давлении даст изменение количества газа, заключенного в машине, соизмеримое с утечкой. По этой причине измерение утечки следует про-



изводить при вполне установившейся температуре в машине, неизменном режиме работы и неизменном расходе охлаждающей воды (и ее неизменной температуре). При нарушении этих условий неизбежны грубейшие ошибки.

Следует отметить, что поскольку давление газа внутри машины измеряется открытым ртутным манометром, то и резкое изменение барометрического давления во время опыта способно исказить его результаты.

Для надежности рекомендуется повторять опыт определения утечки при каждом заданном избыточном давлении не менее двух-трех раз.

### 3-19. Определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Согласно определению ГОСТ 183-55, приложение, п. 16, под коэффициентом искажения синусоидальности периодической кривой понимается выраженное в процентах отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд трех наибольших гармонических составляющих данной периодической кривой к амплитуде ее основной гармонической:

$$k = \frac{100 \sqrt{A_i^2 + A_k^2 + A_l^2}}{A_1} [\%],$$

где  $i$ ,  $k$  и  $l$  в индексах амплитуд могут быть любыми целыми числами; отнюдь не обязательно, чтобы они были связаны между собой какими бы то ни было закономерностями.

Такое определение коэффициента искажения синусоидальности несколько отличается от того, которое дает теория переменных токов, понимающая под ним отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд всех гармонических, кроме основной гармонической:

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} A_i^2 - A_1^2}}{A_1}.$$

В некоторых случаях применяется еще одна разновидность определения, согласно которой под коэффициентом искажения синусоидальности понимается отношение корня квадратного из суммы действующих значений всех гармонических составляющих, кроме основной гармонической, к действующему значению всей кривой в целом:

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} E_i^2 - E_1^2}}{E}.$$

Разница между этими двумя определениями практически очень невелика.

Стандарт не указывает, каким способом должен определяться коэффициент искажения синусоидальности в целом или как должны измеряться амплитуды отдельных гармонических составляющих.

Таких способов может быть предложено всего три:

1) разложение осциллографической записи кривой напряжения на составляющие гармонические известными методами практического гармонического анализа;

2) поочередное измерение амплитуд или действующих значений всех гармонических составляющих при помощи приборов, называемых анализаторами гармонических составляющих; такие приборы находят применение в радиотехнических и акустических измерениях;

3) непосредственное измерение отношения действующего значения суммы всех высших гармонических к действующему значению основной гармонической при помощи приборов, носящих название измерителей нелинейных искажений и также находящихся применение в радиотехнических измерениях.

Для того чтобы выяснить, какому из этих способов следует отдать предпочтение в том или ином случае, необходимо рассмотреть вопрос о возможном составе кривых напряжения синхронных машин.

Здесь нужно различать прежде всего две обособленные группы машин. В первую из них входят синхронные машины прямого и обращенного исполнения как с явновыраженными, так и с неявновыраженными полюсами, имеющие раздельное расположение обмоток якоря и индуктора; к ним относятся почти все без исключения машины пониженной, нормальной и повышенной частоты примерно до 500 гц. Во вторую группу входят синхронные машины индукторного типа с расположением обеих обмоток на статоре; по такой системе выполняются почти исключительно синхронные машины повышенной и высокой частоты (примерно от 300 гц и выше).

Состав кривых напряжения машин этих двух групп резко различен. Характерным для машин первой группы является то, что кривые их напряжения состоят из гармонических только нечетных порядков, причем эти порядки зачастую могут достигать весьма высоких значений; напротив, кривые напряжения машин второй группы могут иметь в своем составе гармонические как нечетных, так и четных порядков, но эти порядки весьма редко выходят из пределов первого десятка.

Причины возникновения высших гармонических в кривых напряжения машин первой группы довольно разнообразны.

1. Гармонические, обусловленные формой очертания полюсов индуктора. Эти гармонические имеют в основном невысокие порядки. В машинах с явновыраженными полюсами наибольшую амплитуду имеет обычно гар-

моническая 5-го порядка, несколько меньшие — гармонические 3-го, 7-го и 9-го порядков. Прочие гармонические представлены обычно весьма слабо.

В машинах с неявновыраженными полюсами их роль играют гармонические, определяемые соотношением обмотанной и необмотанной частей индуктора; в зависимости от этого соотношения изменяется их состав — в одних случаях наиболее сильно представлена гармоническая 3-го порядка, в других — 5-го порядка, но в целом содержание высших гармонических здесь ниже, чем для машин с явновыраженными полюсами.

2. Гармонические, обусловленные зубчатостью якоря. Если число пазов  $Q$ , приходящихся на один полюс, является целым, то в кривой напряжения должны содержаться гармонические парных порядков:

$$1 \cdot 2Q \pm 1 \text{ (I серия)}, \quad 2 \cdot 2Q \pm 1 \text{ (II серия)} \dots \text{ и т. д.}$$

Наибольшее значение имеют гармонические I серии; гармонические II серии обычно еще бывают заметны, но гармонические III серии уже не проявляются. Для машин трехфазного тока представляется более удобным заменить число пазов на полюс  $Q$  числом пазов на полюс и фазу  $q = Q : 3$ :

$$1 \cdot 2 \cdot 3q \pm 1 \text{ (I серия)}, \quad 2 \cdot 2 \cdot 3q \pm 1 \text{ (II серия)} \dots \text{ и т. д.}$$

При дробных числах пазов на полюс и фазу вида

$$q = A + \frac{B}{C},$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — целые числа, порядки гармонических данного рода будут такими же, как при целых числах пазов на полюс и фазу, определяемых равенством

$$q' = AC + B.$$

Таким образом, применение дробных чисел пазов на полюс и фазу очень сильно увеличивает порядки таких гармонических по сравнению с целыми числами пазов на полюс и фазу.

3. Гармонические, обусловленные зубчатостью индуктора. Для машин с явновыраженными полюсами речь идет о зубчатости, определяемой пазами успокоительной обмотки. Если  $t_2$  — шаг пазов успокоительной обмотки и  $\tau$  — полюсное деление, то следует ожидать, что в кривой напряжения содержатся гармонические нечетных порядков, ближайших к числам:

$$\frac{\tau}{t_2} \pm 1 \text{ (I серия)}, \quad 2 \frac{\tau}{t_2} \pm 1 \text{ (II серия)} \dots \text{ и т. д.}$$

Соотношения между амплитудами гармонических каждой серии могут быть весьма различными. Так, например, если величина  $\tau : t_2$  близка к целому нечетному числу, то I серия состоит только из одной гармонической этого нечетного порядка, парная

же к ней отсутствует; обе гармонические II серии выражены при этом очень явственно, но предсказать заранее, которая из них должна быть больше, затруднительно, а III серия обычно уже не проявляется.

Для машин с неявновыраженными полюсами зубчатость индуктора определяется пазами, в которые заложена его обмотка. Если  $Z_2$  есть число делений электрической окружности, по которым расположены пазы индуктора и которое по соображениям удобства механической обработки индуктора берется почти всегда целым, то при нечетном его значении следует ожидать наличия гармонических порядков:

$$Z_2 \text{ (I серия), } 2Z_2 \pm 1 \text{ (II серия) ... и т. д.,}$$

а при четном

$$Z_2 \pm 1 \text{ (I серия), } 2Z_2 \pm 1 \text{ (II серия) ... и т. д.}$$

Но, кроме того, могут появиться еще побочные серии гармонических этого рода, порядки которых связаны с теми множителями, на которые разлагается число  $Z_2$ .

Гармонические, определяемые зубчатостью индуктора, проявляются чрезвычайно сильно в тех случаях, когда их порядки совпадают с порядками гармонических, определяемых зубчатостью якоря, главным образом с их I серий. Это выражено особенно сильно тогда, когда между шагом пазов успокоительной обмотки машины с явновыраженными полюсами и шагом пазов якоря имеется соотношение, близкое к одному из простых: 1:1, 1:2, 2:3 и т. д.

В машинах с неявновыраженными полюсами столь неудачные соотношения встречаются исключительно редко.

4. Гармонические, обусловленные соотношением полюсной дуги индуктора и шага пазов якоря. При определенных соотношениях длины дуги полюсного башмака индуктора с явновыраженными полюсами и шага пазов якоря возникают пульсации магнитного потока. Гармонические, определяемые этими пульсациями, имеют те же порядки, что и гармонические, определяемые зубчатостью якоря.

Содержание высших гармонических в кривых линейного и фазового напряжений машины трехфазного тока неодинаково; в первой не могут содержаться гармонические, порядки которых кратны трем. При сопряжении фаз в звезду это происходит потому, что гармонические этих порядков не образуют разности потенциалов между выводами любых двух фаз, а при сопряжении фаз в треугольник — потому, что для гармонических этих порядков он представляет цепь короткого замыкания, в которой все э. д. с. полностью уравниваются падениями напряжения. Если разорвать треугольник в одной из его вершин, то между разомкнутыми таким образом началом одной фазы и концом

другой будет действовать утроенная сумма высших гармонических, порядки которых кратны трем, но не будет разности потенциалов от гармонических всех прочих порядков, в том числе и от основной гармонической.

На рис. 3-33 дан пример осциллограммы кривой линейного напряжения  $U_L$  и фазового напряжения  $U_\Phi$  машины с сопряжением фаз в звезду. Кроме того, на ней записана еще кривая распределения индукции в зазоре  $B_\delta$ , для чего вдоль одного зубца якоря натянут и закреплен проводник, концы которого поданы

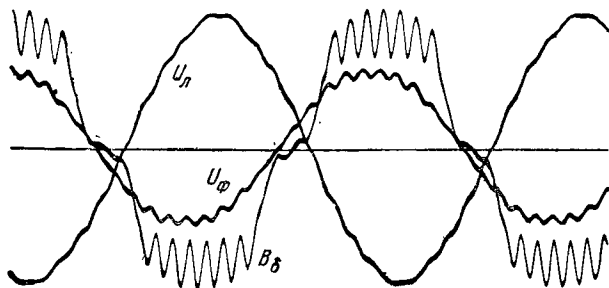


Рис. 3-33. Пример осциллограммы кривой линейного и фазового напряжения и распределения индукции в зазоре.

на вибратор осциллографа через соответствующее добавочное сопротивление.

Шесть глубоких провалов на кривой распределения индукции соответствуют шести пазам успокоительной обмотки в полюсных башмаках индуктора, шаг которых очень близок к  $1/11$  полюсного деления. Соответственно этому кривая фазового напряжения сильно искажена биением гармонических 21-го и 23-го порядков; но поскольку порядок 21 кратен трем, в кривой линейного напряжения его гармоническая отсутствует, и потому искажение этой кривой много меньше.

Обмотка оказывает фильтрующее действие на высшие гармонические, содержащиеся в кривой распределения индукции, за исключением гармонических, определяемых зубчатостью якоря; эти последние воспроизводятся в кривой напряжения наравне с основной гармонической, если еще даже не усиливаются по сравнению с нею действием одной из перечисленных выше причин. В частности, очень существенно фильтрующее действие двухслойных обмоток с укорочением шага по отношению к гармоническим 5-го и 7-го порядков: первая из них исключается при укорочении шага до  $4/5$ , а вторая — до  $6/7$  диаметрального. Вместе с ними исчезают и все высшие гармонические, порядки которых кратны 5 или 7.

**Пример.** Измерения, произведенные анализатором гармонических составляющих на двенадцатиполосном генераторе, имеющем число пазов на полюс и фазу  $q = 2\frac{1}{2}$ , двухслойную обмотку с укорочением шага до  $\frac{4}{5}$  полюсного деления, шаг пазов успокоительной обмотки  $t_2 = 22$  мм и диаметр расточки статора  $D = 750$  мм, дали следующие результаты состава кривых линейного и фазового напряжений в вольтах:

|                        |       |      |    |      |      |       |      |      |
|------------------------|-------|------|----|------|------|-------|------|------|
| Порядок гармонической: | 1     | 3    | 5  | 7    | 9    | 11    | 13   | 15   |
| Линейное напряжение:   | 110,0 | 0    | 0  | 0,70 | 0    | 0,115 | 0,05 | 0    |
| Фазовое напряжение:    | 63,0  | 2,65 | 0  | 0,40 | 0,80 | 0,05  | 0    | 0    |
| Порядок гармонической: | 17    | 19   | 21 | 23   | 25   | 27    | 29   | 31   |
| Линейное напряжение:   | 1,40  | 0,83 | 0  | 0    | 0    | 0     | 0,25 | 0,57 |
| Фазовое напряжение:    | 0,80  | 0,50 | 0  | 0    | 0    | 0     | 0,14 | 0,33 |

В кривой линейного напряжения сильнее всего выражены гармонические порядков 7, 17 и 19; коэффициент искажения синусоидального, согласно ГОСТ 183-55, для него равен

$$k = \frac{100 \sqrt{A_7^2 + A_{17}^2 + A_{19}^2}}{A_1} = \frac{100 \sqrt{0,7^2 + 1,4^2 + 0,83^2}}{110} = 1,61\%.$$

Учет всех измеренных гармонических дает значение  $k = 1,81\%$ , а измерение при помощи измерителя нелинейных искажений  $k = 1,80\%$ .

В кривой фазового напряжения преобладают гармонические порядков 3, 9 и 17; коэффициент искажения по ГОСТ 183-55

$$k = \frac{100 \sqrt{A_3^2 + A_9^2 + A_{17}^2}}{A_1} = \frac{100 \sqrt{2,65^2 + 0,8^2 + 0,8^2}}{63} = 4,57\%.$$

с учетом всех гармонических  $k = 4,68\%$ , а по измерителю нелинейных искажений  $k = 4,70\%$ .

Состав кривых достаточно ясен. Гармоническая 3-го порядка сильно выражена в фазовом напряжении, но отфильтрована с линейным сопряжением фаз в звезду.

Гармоническая 5-го порядка, а вместе с ней 15-го и 25-го порядков отсутствуют благодаря примененному укорочению шага.

Гармоническая 7-го порядка, по-видимому, сильно выражена в кривой распределения индукции, и потому в кривых обоих напряжений представлена в равной доле по отношению к основной гармонической.

Гармоническая 9-го порядка, содержащаяся в фазовом напряжении и отфильтрованная в линейном, обязана своим существованием тому, что шаг успокоительной обмотки почти точно составляет  $\frac{1}{9}$  полюсного деления, которое здесь равно

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 750}{12} = 196,5 \text{ мм};$$

отсюда

$$\frac{\tau}{t_2} = \frac{196,5}{22} = 8,93.$$

Гармонические 11-го и 13-го порядков содержатся в незначительных размерах; причины их появления не очень ясны, — вероятно, они содержатся в кривой распределения индукции.

Гармонические 17-го и 19-го порядков представляют II серию гармонических от зубчатости индуктора; содержание их в обеих кривых по отношению к основной гармонической почти точно одинаково.

Далее идет большой пробел, за которым следуют гармонические 29-го и 31-го порядков, происходящие от зубчатости якоря:

$$q = A + \frac{B}{C} = 2 + \frac{1}{2};$$

$$q' = AC + B = 2 \cdot 2 + 1 = 5;$$

$$6q' \pm 1 = 6 \cdot 5 \pm 1 = 29 \text{ и } 31.$$

Эти гармонические содержатся в обеих кривых примерно в одинаковой доле по отношению к основной гармонической.

Гармонические более высоких порядков обнаружены не были.

При отсутствии специальной аппаратуры для определения коэффициента искажения синусоидальности значение последнего

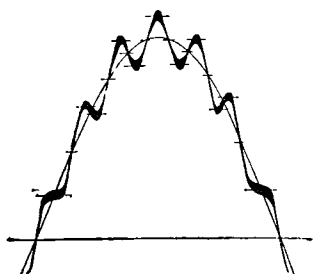


Рис. 3-34. Прием практического определения коэффициента искажения синусоидальности.

может быть приближенно оценено следующим способом, пригодным для кривых с ясно выраженной зубчатостью: на осциллограмме кривой напряжения в каждой впадине и на каждом выступе по середине следа луча вибратора проводятся горизонтальные штрихи (рис. 3-34). Расстояния между каждыми двумя соседними штрихами, отсчитанные по вертикали, делятся пополам и в точках деления наносятся также горизонтальные штрихи. Через точки пересечения этих последних с кривой напряжения проводится по лекалу плавная кривая (тонкая линия на рисунке). Эта кривая весьма

близка к сумме основной гармонической и гармонических наиболее низких порядков — 5 и 7 (если они могут существовать в кривой напряжения данной машины); ее можно разложить на составляющие методами практического гармонического анализа, после чего приближенное значение коэффициента искажения синусоидальности может быть вычислено по формуле

$$k = \frac{100 \sqrt{A_5^2 + A_7^2 + A_k^2}}{A_1},$$

где  $A_1$ ,  $A_5$  и  $A_7$  — амплитуды основной гармонической и гармонических 5-го и 7-го порядков, а  $A_k$  — наибольшая разность ординат между кривой напряжения и нанесенной кривой. Эта разность в подавляющем большинстве случаев лежит поблизости от вершины кривой.

Ошибка подобного определения вряд ли выходит за пределы погрешностей снятия осциллограммы.

В машинах второй группы — индукторного типа — форма кривой напряжения зависит от формы зубцов и впадин ротора; было бы весьма затруднительно дать какие-либо указания о составе кривых напряжения таких машин, кроме упомянутых ранее.

И для этих машин могут быть применены оба вида измерительных приборов — как для анализа кривых по составляющим, так и для измерения коэффициента искажения синусоидальности в целом. Но благодаря простому составу кривых в данном случае с успехом могут применяться методы практического гармонического анализа, которые дают достаточно хорошие результаты, когда гармонические высоких порядков практически отсутствуют.

Так как генераторы индукторного типа имеют обычно высокую частоту, то снятие осциллограммы напряжения, пригодной для графического анализа, при помощи магнитоэлектрического осциллографа с его незначительной скоростью развертки становится невозможным; приходится прибегать к помощи катодного осциллоскопа, фотографируя изображение на его экране или, в крайнем случае, срисовывая кривую на листок прозрачной кальки, приложенный к экрану.

### 3-20. Классификация параметров синхронной машины

Параметрами синхронной машины называются такие характерные для нее величины, знание которых позволяет предопределить ее поведение при различных режимах — как установившихся, так и неуставившихся.

В более узком смысле слова под параметрами подразумеваются различные активные и реактивные сопротивления, введенные современной теорией синхронной машины; однако далеко не все из них составляют предмет опытного определения, и здесь дается только краткая характеристика тех из них, которые могут быть определены при типовом испытании. Все эти параметры относятся к одной фазе обмотки якоря.

#### А. Активные сопротивления

1. Активное сопротивление обмотки якоря  $r_1$  есть сопротивление, определяющее выделение тепла в обмотке якоря при питании ее переменным током номинальной частоты. Оно равно произведению сопротивления  $r_{75}$ , измеренного при помощи постоянного тока, на коэффициент  $k_\phi$ , учитывающий увеличение сопротивления вследствие возникновения вихревых токов в проводниках:

$$r_1 = k_\phi r_{75}.$$



2. Действующее сопротивление обмотки якоря  $r_d$ , уже упоминавшееся при рассмотрении определения потерь короткого замыкания в § 3-7, отличается от активного сопротивления  $r_1$  тем, что учитывает не только добавочные потери в проводниках обмотки от вихревых токов, но и добавочные потери на поверхности стали якоря и индуктора, имеющие место при опыте симметричного короткого замыкания.

3. Активное сопротивление обратной последовательности  $r_2$  отличается от сопротивления  $r_1$  не только тем, что поля рассеяния, образуемые токами обратной последовательности, отличны от образуемых токами прямой последовательности, но и тем, что в его состав входят приведенные сопротивления обмоток индуктора.

### *Б. Реактивные сопротивления при установившихся режимах*

4. Реактивное сопротивление прямой последовательности  $x_1$  есть индуктивное сопротивление обмотки якоря току прямой последовательности, определяемое потоком рассеяния от тока прямой последовательности и потоком реакции якоря по продольной оси.

5. Реактивное сопротивление обратной последовательности  $x_2$  есть индуктивное сопротивление обмотки якоря току обратной последовательности, определяемое потоком рассеяния от тока обратной последовательности и действием обратно-синхронного поля.

6. Реактивное сопротивление нулевой последовательности  $x_0$  есть индуктивное сопротивление обмотки якоря току нулевой последовательности, определяемое потоком рассеяния от тока нулевой последовательности.

7. Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси  $x_d$  во всех отношениях равноценно реактивному сопротивлению прямой последовательности  $x_1$ .

8. Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси  $x_q$  аналогично  $x_d$ , но для поперечной оси машины. В машинах с неявновыраженными полюсами различия между ними практически нет:

$$x_d \approx x_q.$$

9. Рабочее реактивное сопротивление  $x_p$  есть индуктивное сопротивление обмотки якоря, определяемое потоком рассеяния от тока прямой последовательности, а также частично рассеянием в индукторе. Оно относится по существу к машинам с неявновыраженными полюсами, но практически удовлетворительная пригодность их диаграммы в применении к машинам с явновыраженными полюсами позволяет рассматривать  $x_p$  как параметр, относящийся ко всем синхронным машинам.

*В. Реактивные сопротивления при неустановившихся режимах*

10. Переходное реактивное сопротивление по продольной оси  $x'_d$  представляет начальное значение синхронного реактивного сопротивления по продольной оси при переходном режиме.

11. Переходное реактивное сопротивление по поперечной оси  $x'_q$  представляет начальное значение синхронного реактивного сопротивления по поперечной оси при переходном режиме.

В машинах с неявновыраженными полюсами оба последние сопротивления близки друг к другу:

$$x'_d \approx x'_q.$$

12. Сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси  $x''_d$  представляет начальное значение реактивного сопротивления по продольной оси при сверхпереходном режиме.

13. Сверхпереходное реактивное сопротивление по поперечной оси  $x''_q$  представляет начальное значение реактивного сопротивления по поперечной оси при сверхпереходном режиме.

В машинах с неявновыраженными полюсами последние два реактивных сопротивления, подобно предыдущим двум, практически равны между собой:

$$x''_d \approx x''_q.$$

Различие между сверхпереходными и переходными реактивными сопротивлениями выступает тем резче, чем более сильными успокоительными средствами обладает индуктор машины. В машинах, лишенных каких бы то ни было успокоительных средств, каковыми являются машины с явновыраженными полюсами без клеток, имеющими наборные полюсные сердечники, различие между сверхпереходными и переходными значениями стирается; однако полностью исчезнуть оно не может, так как некоторое успокоительное действие остается и в таких машинах за счет электропроводности между отдельными листами полюсов, наличия стяжных шпилек в сердечниках полюсов и т. д.

14. Реактивное сопротивление при удаленном индукторе  $x_s$  представляет индуктивное сопротивление обмотки якоря, обусловленное потоком рассеяния от тока номинальной частоты с номинальным числом фаз, когда якорь находится отдельно от индуктора, за вычетом потока, замыкающегося через пространство, нормально занимаемое индуктором.

Хотя этот параметр относится к несобранной машине, но он, с одной стороны, играет важную роль при вычислении других

параметров, а с другой — близок к реактивному сопротивлению  $x_p$  (взамен которого иногда и применяется); он несколько меньше последнего, так как в него не входит составляющая, определяемая рассеянием в индукторе, которая, впрочем, довольно незначительна.

При опытном определении все перечисленные выше параметры могут быть выражены в единицах сопротивления — омах; но повсеместное применение нашло выражение их в так называемых относительных единицах, под которым подразумевается вычисление отношения падения напряжения, создаваемого номинальным током на этом сопротивлении, к номинальному фазовому напряжению. Для отличия выраженные таким образом параметры обозначаются прописными буквами вместо строчных, например: <sup>1</sup>

$$X_d^* = \frac{I_n x_d''}{U_n}.$$

Такое определение чрезвычайно облегчает сравнение между собой параметров различных машин.

Входящее сюда отношение номинального фазового напряжения  $U_n$  к номинальному фазовому току  $I_n$ , выраженное в омах, носит название номинального сопротивления машины:

$$z_n = \frac{U_n}{I_n} [\text{ом}].$$

Пользуясь этим термином, можно определить переход от абсолютных значений параметров, выраженных в омах, к относительным, выраженным в относительных единицах, как деление на номинальное сопротивление, например:

$$X_d^* = \frac{x_d''}{z_n}.$$

Нередко относительные значения параметров выражаются также в процентах, например:

$$X_d^* = 100 \frac{x_d''}{z_n} [\%].$$

### 3-21. Снятие характеристик несимметричных коротких замыканий

Основой для определения большинства параметров, относящихся к установившимся режимам, может служить снятие характеристик несимметричных коротких замыканий.

<sup>1</sup> Следует отметить, что многие авторы пользуются обратной системой обозначений: прописными буквами — для абсолютных значений и строчными — для выраженных в относительных единицах.

Таких характеристик для трехфазных машин с сопряжением фаз в звезду насчитывается всего три:

- 1) замыкание двух фаз друг на друга;
- 2) замыкание двух фаз на нейтраль;
- 3) замыкание одной фазы на нейтраль.

Помимо снятия зависимостей тока короткого замыкания от тока возбуждения, при этих опытах производится также определение напряжения на свободной фазе, не участвующей в коротком замыкании; оно используется при обработке результатов опытов, а также представляет и самостоятельный интерес, так как иногда достигает очень значительных величин.

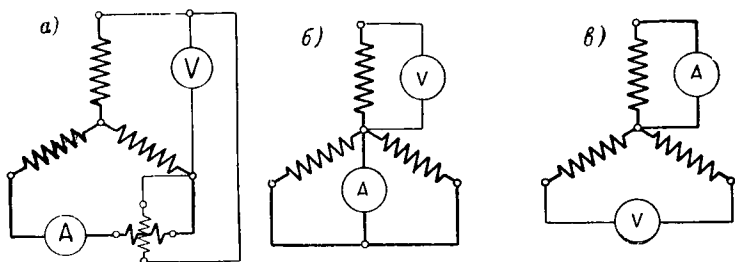


Рис. 3-35. Принципиальные схемы несимметричных коротких замыканий: *а* — двух фаз друг на друга; *б* — двух фаз на нейтраль; *в* — одной фазы на нейтраль.

Принципиальные схемы этих опытов представлены на рис. 3-35; понятно, что амперметры в цепях короткого замыкания подразумеваются включенными через трансформаторы тока, а вольтметры при высоком напряжении — через трансформаторы напряжения. При замыкании двух фаз друг на друга следует включить еще ваттметр, назначение которого выяснится ниже.

При испытании машин с явновыраженными полюсами, кроме крупных гидрогенераторов с вертикальным валом, токи всех несимметричных коротких замыканий могут быть доведены до номинального значения; следует лишь не мешкать с проведением опыта, так как сильное обратно-синхронное поле индуцирует в успокоительных обмотках, массивных полюсных башмаках и т. д. значительные вихревые токи, которые могут повести к быстрому нагреванию этих деталей до нежелательной температуры.

Что касается гидрогенераторов, то в них приходится ограничивать ток короткого замыкания вследствие того, что при замыкании двух фаз друг на друга и одной фазы на нейтраль возникает очень сильная вибрация, которая может иметь неприятные

последствия для машины в механическом отношении. Величина этой вибрации сильно зависит от особенностей конструкции машины, поэтому было бы затруднительно в общем виде указать допустимые значения токов короткого замыкания. При замыкании двух фаз на нейтраль вибрация проявляется значительно слабее, что позволяет в меньшей степени ограничивать предел тока этого вида короткого замыкания.

При испытании машин с неявновыраженными полюсами возникает опасность перегрева бандажей лобовых частей обмотки индуктора за счет

обратно-синхронных полей рассеяния в лобовых частях обмотки якоря; поэтому не следует поднимать токи короткого замыкания двух фаз друг на друга и одной фазы на нейтраль выше 25—30% номинального, а двух фаз на нейтраль — выше 40—45% номинального.

Измерение потерь в опытах несимметричных коротких замыканий обычно не представляет интереса; тем не менее частота

должна поддерживаться номинальной, так как при отступлении от нее результаты обработки опытов окажутся неверными. Если же удержать частоту на уровне номинальной не удастся, необходимо пересчитать измеренные напряжения так, как это делается в опыте холостого хода.

Все характеристики должны быть приведены к началу координат таким же способом, как характеристики холостого хода и симметричного короткого замыкания.

На рис. 3-36 изображены характеристики всех видов короткого замыкания и характеристика холостого хода. Наиболее отвесной является характеристика короткого замыкания одной фазы на нейтраль  $I_{K1} = f(i_K)$ , затем двух фаз на нейтраль  $I_{K20} = f(i_K)$ , двух фаз друг на друга  $I_{K2} = f(i_K)$  и, наконец, наиболее отлогой — характеристика симметричного короткого замыкания  $I_{K3} = f(i_K)$ .

Для определения соотношений наклонов характеристик можно воспользоваться либо значениями токов короткого замыкания при одном и том же токе возбуждения, например соответствующем номинальному напряжению по характеристике холостого хода, либо значениями токов возбуждения, соответствующих одному и тому же значению тока короткого замыкания, например

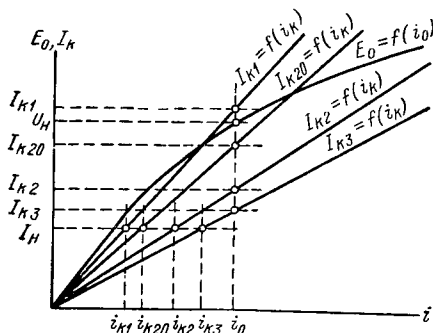


Рис. 3-36. Характеристики несимметричных коротких замыканий.

номинальному; действительно, из подобия треугольников на рис. 3-36 легко установить:

$$\frac{i_{k3}}{i_0} = \frac{I_n}{I_{k3}}; \quad \frac{i_{k2}}{i_0} = \frac{I_n}{I_{k2}} \text{ и т. д.}$$

Для машин с неявновыраженными полюсами в среднем

$$I_{k3} : I_{k2} : I_{k1} = \frac{1}{i_{k3}} : \frac{1}{i_{k2}} : \frac{1}{i_{k1}} = 1 : 1,6 : 2,7.$$

Несколько труднее установить это отношение для тока  $I_{k20}$ ; обычно оно заключено между токами  $I_{k2}$  и  $I_{k1}$ .

Для машин с явновыраженными полюсами эти соотношения менее определены; в частности, для гидрогенераторов они близки к

$$I_{k3} : I_{k2} : I_{k20} : I_{k1} = 1 : 1,2 : 1,5 : 2,2.$$

### 3-22. Определение синхронных реактивных сопротивлений

При рассмотрении симметричного короткого замыкания было выяснено, что ток возбуждения при нем определяется двумя факторами: одна часть его идет на уравнивание реакции якоря, являющейся в этом случае почти чисто продольной, а другая — на создание магнитного потока, необходимого для индуктирования э. д. с., равной по величине падению напряжения от тока короткого замыкания на реактивном сопротивлении обмотки, определяемом потоками рассеяния этого тока. Таким сопротивлением является рабочее реактивное сопротивление  $x_p$ . Однако можно представить, что не только эта последняя часть, но весь ток возбуждения идет на создание потока, индуктирующего э. д. с.  $E_x$ , равную по величине падению напряжения на некотором воображаемом реактивном сопротивлении, заменяющем оба фактора. Таким сопротивлением и является реактивное сопротивление прямой последовательности  $x_1$  или равное ему синхронное реактивное сопротивление по продольной оси  $x_d$ . Оно во столько раз больше  $x_p$ , во сколько весь ток возбуждения при симметричном коротком замыкании больше той его части, которая соответствует упомянутой э. д. с. рассеяния.

Отсюда вытекает способ определения  $x_1$ . На рис. 3-37 совместно отложены характеристики холостого хода и симметричного короткого замыкания. Там же изображен реактивный треугольник  $ABC$ , вертикальный катет которого  $\overline{CB}$  представляет реактивное падение напряжения  $I_{k3}x_p$ . При изменении тока короткого замыкания вершина  $B$  треугольника скользит по характеристике холостого хода, которая в нижней части прямолинейна. Если продолжить эту прямолинейную часть до пересечения в точке  $D$  с перпендикуляром к оси абсцисс, восстановленным из

точки  $A$ , то на основании подобия треугольников  $OAD$  и  $OCB$  можно будет написать:

$$\frac{\overline{OA}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{AD}}{\overline{CB}} = \frac{I_{к3}x_1}{I_{к3}x_p} = \frac{x_1}{x_p};$$

отсюда следует, что

$$x_1 = \frac{I_{к3}x_p}{I_{к3}} = \frac{E_x}{I_{к3}},$$

т. е. для определения  $x_1$  или  $x_d$  нужно разделить фиктивную фазовую э. д. с.  $E_x$ , взятую по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при некотором произвольном токе возбуждения, на ток симметричного короткого замыкания  $I_{к3}$  при этом же токе возбуждения.

Этот метод определения  $x_1$  или  $x_d$  не является единственным.

Ток, создающий падение напряжения на реактивном сопротивлении  $x_p$  и реакцию якоря, может быть не только генерирован самой испытываемой машиной, но и подведен к ней от постороннего источника. Если при этом вращать ротор машины с синхронной скоростью, то в зависимости от относительного расположения полюсов поля реакция якоря и полюсов индуктора при невозбужденной и разомкнутой обмотке последнего сопротивление обмотки якоря питающему ее току будет изменяться от величины  $x_d$ , когда полюса индуктора и поля реакции якоря расположены прямо друг против друга, до величины  $x_q$ , когда полюса поля реакции якоря расположены прямо против промежутков между полюсами индуктора.

В принципе осуществимо не только длительное сохранение какого-либо из этих двух крайних положений, но и плавный переход от одного из них к другому.

Обычно применяется следующий способ: испытываемая машина с разомкнутой обмоткой индуктора приводится во вращение со скоростью, очень немного отличающейся от синхронной. К обмотке якоря прикладывается сильно пониженное трехфазное напряжение. Так как ротор вращается со скольжением, то полюса индуктора проходят по отношению к полюсам поля реакции якоря через все возможные положения, вследствие

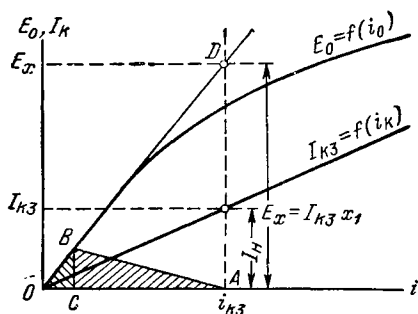


Рис. 3-37. Определение  $x_1$  по характеристикам холостого хода и симметричного короткого замыкания.

ное трехфазное напряжение. Так как ротор вращается со скольжением, то полюса индуктора проходят по отношению к полюсам поля реакции якоря через все возможные положения, вследствие

чего реактивное сопротивление якоря питающему его току периодически колеблется между значениями  $x_d$  и  $x_q$ . Если бы приложенное линейное напряжение  $U$  оставалось неизменным, ток изменялся бы при этом между значениями

$$I_{\min} = \frac{U}{x_d \sqrt{3}} \text{ и } I_{\max} = \frac{U}{x_q \sqrt{3}}.$$

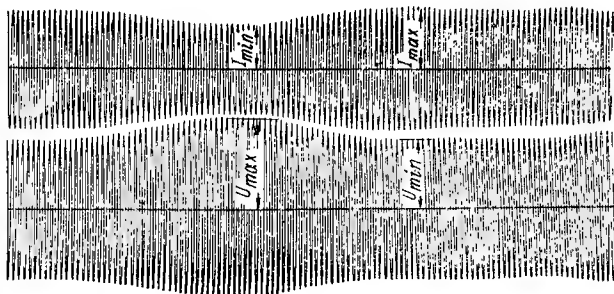


Рис. 3-38. Определение  $x_d$  и  $x_q$  при помощи осциллографа.

Но фактически напряжение не остается неизменным; вследствие неизбежных падений напряжения в подводящих проводах и источнике питания оно также периодически изменяется между некоторыми двумя значениями, большее из которых соответствует меньшему току, и наоборот; поэтому

$$x_d = \frac{U_{\max}}{I_{\min} \sqrt{3}} \text{ и } x_q = \frac{U_{\min}}{I_{\max} \sqrt{3}}.$$

Отсчеты тока и напряжения могут производиться по амперметру и вольтметру, включенным в любые фазы. Если еще к зажимам обмотки индуктора подключить магнитоэлектрический вольтметр с нулем в середине шкалы, то он поможет более точному определению моментов, в которые следует производить отсчеты: при прохождении его стрелки через нуль должен производиться отсчет для определения  $x_d$ , а при его наибольшем отклонении — для определения  $x_q$ .

Вместо отсчетов по приборам можно воспользоваться записью при помощи осциллографа, пример которой представлен на рис. 3-38.

Очень важно, чтобы скольжение было как можно меньшим, потому что в противном случае стрелки приборов переменного тока не успевают следовать изменениям измеряемых ими величин, из-за чего вычисленные значения  $x_d$  будут меньше, а  $x_q$  — больше действительных.

Главное затруднение этого опыта состоит в том, что необходимо удерживать испытываемую машину от впадения в синхро-



низм с источником питания за счет реактивного момента. С этой целью приходится подавать в обмотку якоря ток, сильно пониженный против номинального. Чем больше маховой момент вращающихся масс, тем равномернее происходит вращение; если же маховые массы недостаточны, то обнаруживается заметное ускорение вращения при переходе от положения, соответствующего  $x_q$ , к положению, соответствующему  $x_d$ , и замедление при обратном переходе.

При сопряжении испытываемой машины с асинхронным двигателем, имеющим то же самое число полюсов, и питании обмотки якоря через соответствующий понизительный трансформатор от того же источника, от которого питается двигатель, опыт проводится очень просто; чем относительно больше мощность приводного двигателя, тем меньше его скольжение и тем плавнее происходит переход от одного положения к другому.

При сопряжении двух одинаковых или близких друг к другу синхронных машин затруднительно создать малое скольжение без помощи достаточно сложной схемы, подобной схеме возвратной работы с применением машин постоянного тока. В этом случае с успехом применяется следующий способ: с машины, идущей в режиме двигателя, снимается возбуждение; затем в обмотку индуктора постепенно подается питание противоположного направления, в результате чего при некотором значении тока возбуждения эта машина уже больше не в состоянии удержаться в синхронизме, и ее индуктор проскальзывает на одно полюсное деление. В этот момент должно быть произведено осциллографирование тока и напряжения питания испытываемой машины. Так как положения, соответствующие  $x_d$  и  $x_q$ , отстоят одно от другого только на половину полюсного деления, оба они обязательно будут пройдены в пределах этого проскальзывания.

### 3-23. Определение активного и реактивного сопротивлений обратной последовательности

Подобно тому, как реактивное сопротивление прямой последовательности  $x_1$  определяется из опыта симметричного короткого замыкания, реактивное сопротивление обратной последовательности  $x_2$  может быть определено из опыта короткого замыкания двух фаз друг на друга.

Пусть короткое замыкание осуществлено между фазами 2 и 3; в обмотках этих фаз устанавливается один и тот же ток  $I_{к2}$ , который по методу симметричных составляющих может быть разложен на две симметричные системы — прямой и обратной последовательности, состоящие из одинаковых между собой по величине токов.

На рис. 3-39 векторы токов системы прямой последовательности  $I, 2, 3$  изображены сплошными линиями, а векторы токов системы обратной последовательности  $I', 2', 3'$  — пунктиром. Токи прямой и обратной последовательности в первой фазе взаимно уничтожаются, а во второй и третьей — складываются и дают два тока:  $II$  и  $III$ , которые на диаграмме направлены в прямо противоположные стороны, так как, если ток короткого замыкания в некоторый момент времени в одной из этих фаз направлен от начала к концу, то в другой — от конца к началу. Сложение составляющих в этих фазах происходит под углом  $60^\circ$ , поэтому их суммы больше каждого из слагаемых в  $\sqrt{3}$  раз.

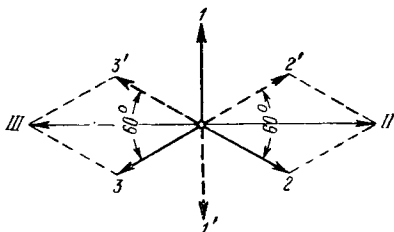


Рис. 3-39. Разложение тока короткого замыкания двух фаз друг на друга на симметричные составляющие.

Если здесь, как и в случае симметричного короткого замыкания, продолжить прямолинейную часть характеристики холостого хода до пересечения с перпендикуляром к оси абсцисс (рис. 3-40), восстановленным из точки на этой оси, соответствующей току возбуждения  $I_{k2}$  при замыкании двух фаз друг на друга, то можно будет представить фиктивную линейную э. д. с.  $E_x \sqrt{3}$ , как состоящую из двух частей: одна из них уравновешивает падение напряжения, создаваемое составляющей тока короткого замыкания от тока прямой последовательности на сумме реактивных сопротивлений двух фаз  $2x_1$ , а другая — падение напряжения, создаваемое составляющей тока короткого замыкания от тока обратной последовательности на сумме реактивных сопротивлений двух фаз  $2x_2$ .

Если обозначить ток короткого замыкания через  $I_{k2}$ , то каждая из этих его составляющих равна по величине  $I_{k2}/2$ ; следовательно,

$$E_x \sqrt{3} = \frac{I_{k2}}{2} (2x_1 + 2x_2) = I_{k2} (x_1 + x_2),$$

откуда

$$x_2 = \frac{E_x \sqrt{3}}{I_{k2}} - x_1.$$

На этом основан первый из рассматриваемых ниже методов определения  $x_2$ .

**1. Метод холостого хода и коротких замыканий — симметричного и двух фаз друг на друга.** Этот метод известен также под

названием метода Фаллу. Если определить при одном и том же токе возбуждения  $i_{k3}$  (рис. 3-41):

а) э. д. с.  $E_x$  — по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода;

б) ток  $I_{k3}$  — по характеристике симметричного короткого замыкания;

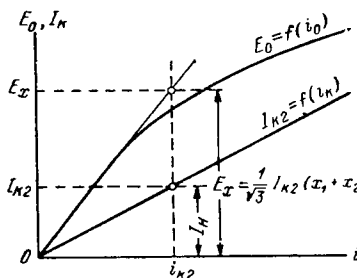


Рис. 3-40. Определение  $x_2$  по характеристикам холостого хода и короткого замыкания двух фаз друг на друга.

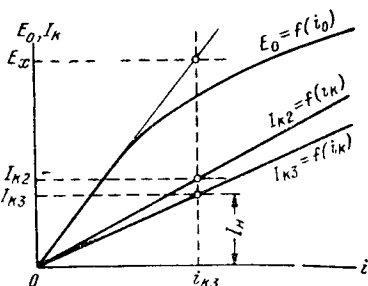


Рис. 3-41. Определение  $x_2$  по характеристикам холостого хода и коротких замыканий — симметричного и двух фаз друг на друга.

в) ток  $I_{k2}$  — по характеристике короткого замыкания двух фаз друг на друга, то

$$I_{k3} = \frac{E_x}{x_1};$$

$$I_{k2} = \frac{E_x \sqrt{3}}{x_1 + x_2},$$

откуда

$$x_2 = \frac{E_x \sqrt{3}}{I_{k2}} - \frac{E_x}{I_{k3}} = E_x \left( \frac{\sqrt{3}}{I_{k2}} - \frac{1}{I_{k3}} \right).$$

Этот метод прост, но не отличается точностью, так как в нем результат определяется разностью двух близких друг к другу величин.

**2. Метод измерения фиктивной мощности при коротком замыкании двух фаз друг на друга.** Этот метод называется в литературе методом Бекку или методом Вагнера — Довжикова. Поле, сцепленное с обмоткой индуктора, за вычетом полей рассеяния последнего, индуцирует в обмотке фазы, не участвующей в коротком замыкании, или так называемой свободной фазы, э. д. с., равную той, которая уравнивает падение напряжения от тока короткого замыкания.

Падение напряжения в одной фазе от полей рассеяния обмотки якоря составляет:

$$\frac{I_{k2}}{\sqrt{3}}(x_2 + x_s) \approx \frac{I_{k2}}{\sqrt{3}} 2x_2,$$

где  $x_s$  есть реактивное сопротивление одной фазы обмотки якоря при удаленном индукторе.

Так как индуктирование э. д. с. по оси свободной фазы происходит не только в этой фазе, но и в фазах, замкнутых накоротко, расположенных по отношению к ней под углами в 120 электрических градусов, то напряжение, измеренное между свободной фазой и точкой короткого замыкания, увеличивается в  $\sqrt{3}/2$  раза и составляет:

$$U_{k2} = \sqrt{3} I_{k2} x_2,$$

откуда

$$x_2 = \frac{U_{k2}}{I_{k2} \sqrt{3}}.$$

Однако такое равенство достаточно верно только тогда, когда активное сопротивление обратной последовательности  $r_2$  настолько мало по сравнению с  $x_2$ , что им можно пренебречь; в противном случае оно дает величину полного сопротивления обратной последовательности

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}.$$

Для выделения  $x_2$  в этом случае можно воспользоваться следующим приемом. Э. д. с., индуцируемая обратно-синхронным полем в свободной фазе, опережает на  $1/4$  периода сопряженную э. д. с., индуцируемую этим же полем в двух короткозамкнутых фазах (рис. 3-42). Если величиной  $r_2$  можно пренебречь, то ток обратной последовательности  $I_{k2}$  должен отставать от этой э. д. с. ровно на  $1/4$  периода, следовательно, от э. д. с. в свободной фазе — на  $1/2$  периода. Ваттметр, включенный так, что его обмотка напряжения присоединена между точкой короткого замыкания и свободной фазой, а обмотка тока введена в цепь короткого замыкания (см. рис. 3-35, а), должен был бы дать показание

$$P = U_{k2} I_{k2};$$

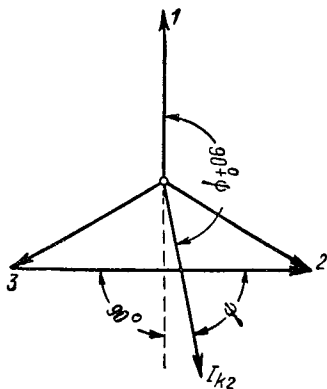


Рис. 3-42. Диаграмма э. д. с. при коротком замыкании двух фаз друг на друга.

но при наличии заметного активного сопротивления  $r_2$  сдвиг  $\psi$  между э. д. с. и током в цепи короткого замыкания меньше чем  $1/4$  периода, причем

$$\sin \psi = \frac{x_2}{z_2};$$

поэтому и показание ваттметра будет меньше:

$$P = U_{k2} I_{k2} \cos(\psi + 90^\circ) = U_{k2} I_{k2} \sin \psi = U_{k2} I_{k2} \frac{x_2}{z_2};$$

отсюда следует, что в этом случае

$$x_2 = \frac{U_{k2}}{I_{k2} \sqrt{3}} \cdot \frac{P}{U_{k2} I_{k2}} = \frac{P}{I_{k2}^2 \sqrt{3}}.$$

Заодно можно определить и активное сопротивление

$$r_2 = \frac{U_{k2}}{I_{k2} \sqrt{3}} \sqrt{1 - \left( \frac{P}{U_{k2} I_{k2}} \right)^2},$$

что, впрочем, не отличается особой точностью, поскольку под корнем стоит разность двух близких величин.

Следует отметить, что все рассуждения проводились для ненасыщенного состояния машины, так как э. д. с. предполагались взятыми по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода; между тем в опыте измеряется реальная величина напряжения на свободной фазе  $U_{k2}$ , подверженная влиянию насыщения. Поэтому следовало бы для подсчетов  $x_2$  при номинальном значении тока обратной последовательности доводить характеристику данного короткого замыкания до значения тока  $I_{k2} = I_n \sqrt{3}$ ; это, однако, невозможно по причинам, отмеченным в § 3-21. Остается только проводить вычисление  $x_2$  для ряда значений тока  $I_{k2}$  в пределах опыта и откладывать их в зависимости от тока.

**3. Метод обратно-синхронного вращения.** Подобно тому, как реактивное сопротивление прямой последовательности  $x_1$  (вернее  $x_d$  и  $x_q$ ) может быть определено не только в режиме генератора, но и при питании вращающейся машины от постороннего источника с прямой последовательностью фаз, реактивное сопротивление обратной последовательности  $x_2$  поддается определению при питании вращающейся машины от постороннего источника, но с обратным чередованием фаз.

Такое вращение машины по существу является режимом электромагнитного тормоза при скольжении, равном 200%. Понятно, что обмотка индуктора должна быть при этом замкнута накоротко, в противном случае в ней индуцируется э. д. с. опасной величины, а результат опыта будет неверным, поскольку в нормальной эксплуатации она замкнута на якорь возбудителя, что мало отличается от короткого замыкания.

Если во время опыта производится измерение мощности, подведенной от постороннего источника, то он дает возможность определения не только  $x_2$ , но и  $r_2$  по формуле

$$r_2 = \frac{P - P_{\text{ст}}}{3I^2},$$

где  $P$  — подведенная мощность;

$P_{\text{ст}}$  — потери в стали, взятые из опыта холостого хода соответственно среднему измеренному линейному напряжению  $U$ ;

$I$  — средний измеренный ток.

Отсюда

$$x_2 = \frac{\sqrt{3}(UI)^2 - (P - P_{\text{ст}})^2}{3I^2}.$$

Проведение этого опыта встречает затруднение в том, что при больших значениях тока  $I$  развивается значительный тормозящий момент, а успокоительные обмотки и все массивные детали на поверхности индуктора сильно нагреваются (что заставляет проводить опыт очень осторожно, при сильно пониженных значениях тока, составляющих всего лишь несколько процентов от номинального). Трудность поддержания скорости вращения отпадает в случае привода испытываемой машины от синхронного или асинхронного двигателя с тем же числом полюсов, что и у испытываемой машины.

### 3-24. Определение реактивного сопротивления нулевой последовательности

Приложение к опыту короткого замыкания одной фазы на нейтраль примененного уже выше метода нахождения фиктивной э. д. с. и разделения ее на составляющие позволяет определить реактивное сопротивление нулевой последовательности  $x_0$  подобно тому, как это было сделано в отношении  $x_1$  и  $x_2$ .

Пусть короткому замыканию на нейтраль подвергнута фаза 1. Разложение тока короткого замыкания по методу симметричных составляющих дает в данном случае три системы одинаковых между собой по величине токов: прямой, обратной и нулевой последовательности (см. рис. 3-43), где векторы токов системы прямой последовательности 1, 2, 3 изображены сплошными линиями, обратной последовательности 1', 2', 3' — пунктиром и нулевой последовательности 1'', 2'', 3'' — точечным пунктиром. Токи всех трех последовательностей в первой фазе совпадают по направлению и потому складываются в общий ток  $I_{\text{к1}}$ , а во второй и третьей фазах в геометрической сумме дают нуль.

Продолжение прямолинейной части характеристики холостого хода до пересечения с перпендикуляром к оси абсцисс, восстановленным из точки, соответствующей току возбуждения  $i_{к1}$  при замыкании одной фазы на нейтраль, определяет фиктивную э. д. с.  $E_x$  (рис. 3-44), которую можно

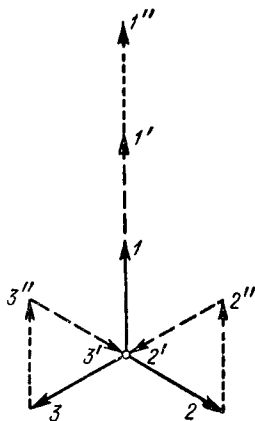


Рис. 3-43. Разложение тока короткого замыкания одной фазы на нейтраль на симметричные составляющие.

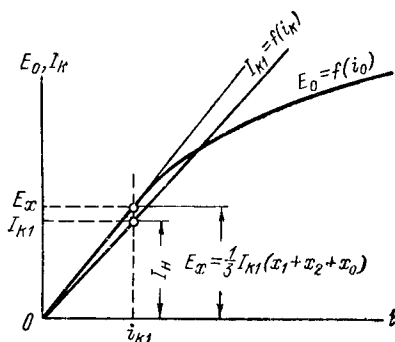


Рис. 3-44. Определение  $x_0$  по характеристикам холостого хода и короткого замыкания одной фазы на нейтраль.

представить состоящей из трех частей: первая уравнивает падение напряжения, создаваемое током прямой последовательности на реактивном сопротивлении  $x_1$ , вторая — падение напряжения, создаваемое током обратной последовательности на реактивном сопротивлении  $x_2$ , и третья — падение напряжения от тока нулевой последовательности на искомом реактивном сопротивлении  $x_0$ .

Каждая из составляющих тока короткого замыкания равна по величине  $I_{к1} : 3$ ; следовательно,

$$E_x = \frac{I_{к1}}{3} (x_1 + x_2 + x_0),$$

откуда

$$x_0 = \frac{3E_x}{I_{к1}} - x_1 - x_2.$$

На этом основан первый из рассматриваемых методов определения  $x_0$ .

1. Метод холостого хода и коротких замыканий — двух фаз друг на друга и одной фазы на нейтраль. Этот метод назы-

вается также методом Толвинского — Ефремова. Если определить при одном и том же токе возбуждения  $i_{кз}$  (рис. 3-45):

а) э. д. с.  $E_x$  — по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода;

б) ток  $I_{к2}$  — по характеристике короткого замыкания двух фаз друг на друга;

в) ток  $I_{к1}$  — по характеристике короткого замыкания одной фазы на нейтраль, то

$$I_{к2} = \frac{E_x \sqrt{3}}{x_1 + x_2}.$$

$$I_{к1} = \frac{3E_x}{x_1 + x_2 + x_0},$$

откуда

$$x_0 = \frac{3E_x}{I_{к1}} - \frac{E_x \sqrt{3}}{I_{к2}} = E_x \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{I_{к1}} - \frac{1}{I_{к2}} \right).$$

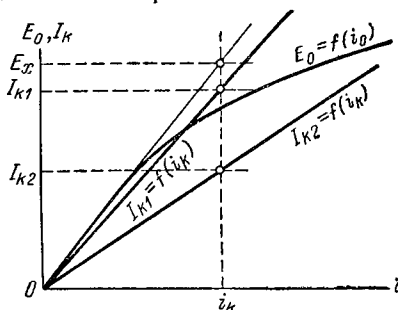


Рис. 3-45. Определение  $x_0$  по характеристикам холостого хода и коротких замыканий двух фаз друг на друга и одной фазы на нейтраль.

Подобно методу холостого хода и коротких замыканий для определения  $x_2$  этот метод прост, но не отличается точностью, так как его результат также определяется разностью близких величин.

**2. Метод измерения напряжения на свободной фазе при коротком замыкании двух фаз на нейтраль.** Этот метод называется в литературе методом Райта. Согласно методу симметричных составляющих напряжение нулевой последовательности равно:

$$\bar{U}_0 = \frac{1}{3} (\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3),$$

где  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{U}_2$  и  $\bar{U}_3$  — векторы напряжения трех фаз; точно так же ток нулевой последовательности равен:

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3),$$

где  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$  и  $\bar{I}_3$  — векторы токов трех фаз.

Если осуществить короткое замыкание на нейтраль двух фаз, например фаз 2 и 3, то напряжения этих фаз будут равны нулю, поэтому в выражении для  $\bar{U}_0$  останется только напряжение на свободной фазе  $\bar{U}_{к20}$ :

$$\bar{U}_0 = \frac{1}{3} \bar{U}_1 = \frac{1}{3} \bar{U}_{к20}.$$



Что же касается тока, то в свободной фазе  $I$  он равен нулю, и потому

$$\bar{I}_0 = -\frac{1}{3} (\bar{I}_2 + \bar{I}_3);$$

но геометрическая сумма токов фаз 2 и 3 равна току в нейтрале  $\bar{I}_{к20}$ , откуда

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3} \bar{I}_{к20}.$$

Следовательно, пренебрегая активным сопротивлением,

$$x_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{\frac{1}{3} U_{к20}}{\frac{1}{3} I_{к20}} = \frac{U_{к20}}{I_{к20}}.$$

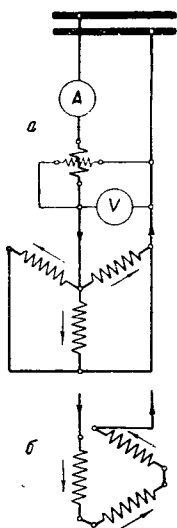


Рис. 3-16. Определение  $x_0$  при однофазном питании всех трех фаз якоря: *а* — параллельное соединение фаз; *б* — последовательное соединение фаз.

Как и в методе измерения фиктивной мощности для определения  $x_2$ , здесь нельзя ограничиться определением значения  $x_0$  для какого-либо одного значения тока короткого замыкания; так как в опыте производится измерение реальной величины напряжения на свободной фазе  $U_{к20}$ , подверженной влиянию насыщения, следовало бы доводить значение тока  $I_{к20}$  до значения, равного трехкратному номинальному, что, конечно, невозможно; остается только производить вычисление  $x_0$  для различных значений тока в пределах опыта и откладывать их в зависимости от тока.

**3. Метод постороннего однофазного питания.** Этот метод называется также методом Моргана и Райта. Подобно  $x_1$  и  $x_2$  при питании обмотки якоря от постороннего источника может быть определено и  $x_0$ . Для этой цели при замкнутой накоротко обмотке индуктора к обмотке якоря подается питание от постороннего источника, на этот раз однофазного тока, так как система токов нулевой последовательности есть однофазная система. Обмотка якоря должна быть соединена так, чтобы направления токов в фазах совпадали; это можно сделать как при параллельном соединении всех трех фаз, так и при последовательном.

Параллельное соединение фаз достигается использованием схемы симметричного короткого замыкания, питаемой однофазным током, приложенным между нейтралью и короткозамыкающими соединениями

(рис. 3-46, а), а последовательное — сопряжением фаз в треугольник, питаемый через одну вскрытую вершину (рис. 3-46, б). В обоих случаях производится измерение приложенного напряжения и потребляемого тока; в первом случае, при параллельном соединении фаз,

$$x_0 = \frac{3U}{I},$$

во втором же, при последовательном соединении,

$$x_0 = \frac{U}{3I}.$$

Таким образом, при одном и том же напряжении постороннего источника  $U$  потребляемый ток  $I$  в случае последовательного соединения фаз в девять раз меньше, чем в случае параллельного соединения. Кроме того, при последовательном соединении всегда обеспечивается равенство токов во всех участках обмотки по величине и по фазе, что весьма существенно для достижения правильного результата; поэтому способ последовательного соединения предпочтительнее способа параллельного соединения. Опыт показывает, что в данном случае не требуется поддерживать строго синхронное вращение ротора, но результат зависит от того, вращается ротор или нет, что хотя и позволяет проводить опыт при неподвижном роторе, но делает результат его менее точным.

Если при опыте производить измерение потребляемой мощности, то можно определить также активное сопротивление для нулевой последовательности чередования фаз; но ввиду его относительной малости это определение ненадежно, к тому же особой нужды в нем не встречается.

Если при испытании для определения  $x_2$  и  $x_0$  применены методы холостого хода и коротких замыканий, описанные выше, то в целях контроля, но отнюдь не как самостоятельный, может быть применен метод холостого хода и коротких замыканий — симметричного и одной фазы на нейтраль, именуемый методом Каппа, дающий сумму  $x_2$  и  $x_0$ , поскольку он не требует проведения каких-либо дополнительных опытов. Для него нужно лишь определить при одном и том же токе возбуждения  $i_{k3}$  (рис. 3-47):

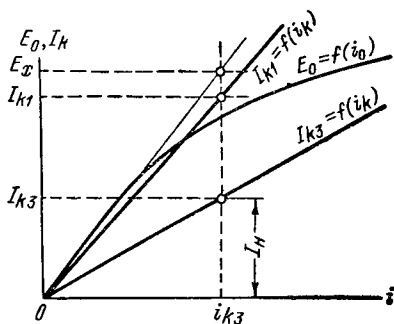


Рис. 3-47. Определение суммы  $x_2 + x_0$ .

а) э. д. с.  $E_x$  — по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода;

б) ток  $I_{к3}$  — по характеристике симметричного короткого замыкания;

в) ток  $I_{к1}$  — по характеристике короткого замыкания одной фазы на нейтраль.

Из равенств

$$I_{к3} = \frac{E_x}{x_1}$$

и

$$I_{к1} = \frac{3E_x}{x_1 + x_2 + x_0}$$

следует, что

$$x_2 + x_0 = E_x \left( \frac{3}{I_{к1}} - \frac{1}{I_{к3}} \right).$$

Необходимо сделать одно весьма важное замечание о точности результатов определения реактивных сопротивлений обратной и нулевой последовательности из опытов, в основе которых лежит снятие характеристик несимметричных коротких замыканий. Если в процессе снятия этих характеристик производить осциллографирование формы кривых измеряемых токов и напряжений, то можно заметить, что они отличаются от синусоидальных тем в большей степени, чем слабее успокоительные средства машины. По этой причине в счет измеряемых величин входят не только их основные волны, но и высшие гармонические. Однако все рассуждения по поводу определения параметров из опытов несимметричных коротких замыканий проведены для синусоидальных величин; отсюда следует, что результаты такого определения будут тем дальше от действительности, тем больше засоренность кривых напряжений и токов высшими гармоническими.

Опыт подтверждает эти соображения; действительно, если сравнивать между собой значения реактивных сопротивлений обратной и нулевой последовательности, полученные различными методами, то обнаруживается, что расхождения между результатами применения различных методов тем меньше, чем совершеннее успокоение машины.

Если бы можно было подвергать кривые токов и напряжений разложению по правилам гармонического анализа и затем проводить все вычисления только для их основных волн, то упомянутое расхождение результатов было бы сведено к минимуму; однако для практики испытания электрических машин такое решение вопроса является чрезмерно громоздким.

По этой причине современная практика испытаний предпо-

читает пользоваться для определения реактивных сопротивлений методами, не требующими проведения опытов несимметричных коротких замыканий, т. е. методом обратно-синхронного вращения для определения  $x_2$  и методом постороннего однофазного питания для определения  $x_0$ .

### 3-25. Опыт внезапного короткого замыкания

Наиболее естественным методом определения переходных и сверхпереходных реактивных сопротивлений является фактическое осуществление тех режимов, при которых они действуют, в первую очередь внезапного симметричного короткого замыкания.

Согласно требованиям ГОСТ 183-55, п. 11, каждая синхронная машина должна быть способна выдержать без повреждений внезапное симметричное короткое замыкание при 105% номинального напряжения холостого хода. Однако в п. 34 оговаривается, что этот опыт производится не при каждом типовом испытании, но лишь над тем типом, который обладает наибольшим полюсным делением из числа типов данной серии. Такая оговорка вполне естественна, поскольку машина, выдержавшая ударное короткое замыкание без видимых последствий, может все же получить в результате его незаметные повреждения, которые с течением времени проявятся в виде неожиданного и как будто ничем не объяснимого пробоя изоляции обмотки якоря; поэтому прибегать к такому опыту без действительной необходимости вряд ли целесообразно, а при типовых испытаниях для определения параметров неустановившихся режимов можно ограничиться проведением опыта при напряжении, пониженном до  $1/4$  номинального.

Опыт внезапного короткого замыкания при 105% номинального напряжения требует особой тщательности проведения во всех деталях и полной надежности применяемых приборов и приспособлений, так как большей частью не может быть повторен в случае неудачи.

Единственным способом записи неустановившихся режимов является снятие осциллограммы; все искомые величины получаются из ее обработки и потому зависят от ее правильности, четкости и тщательности определения масштабов.

Короткое замыкание может осуществляться масляным выключателем с дистанционным управлением; при выборе выключателя следует отдать предпочтение конструкциям с расположением рабочих контактов в масле перед конструкциями с рабочими контактами в воздухе, так как в этом случае представляется возможным удалить искрогасительные контакты, недостаточно надежные для первого момента включения.

Очень важно, чтобы замыкание всех трех фаз происходило совершенно одновременно, для чего следует отрегулировать контакты при медленном включении от руки, а при больших размерах выключателя — при помощи домкрата, воздействующего на включающий механизм. Для проверки к короткозамыкающей перемычке на одной стороне выключателя подается одна полярность постоянного напряжения, а к контактам другой стороны присоединяются три лампы, соединенные с другой полярностью (рис. 3-48). Контакты регулируются на возможно лучшую одновременно

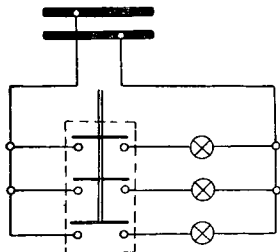


Рис. 3-48. Проверка одновременности замыкания фаз.

временность вспыхивания ламп. После этого одновременность замыкания может быть проверена при нормальной работе приводного механизма путем снятия осциллограммы включения того напряжения, при котором будет производиться опыт, при наибольшей возможной скорости движения ленты осциллографа, для чего закорачивающая перемычка заменяется схемой из трех трансформаторов напряжения; это дает ясное представление о работе контактов.

Чем больше номинальный ток выключателя, тем лучше; во всяком случае, его динамическая устойчивость

должна быть вполне достаточной для того, чтобы выдержать предполагаемый ударный ток.

Иногда для замыкания применяется специальное гильотинное приспособление, состоящее из трех пружинных контактов, похожих на контакты рубильников, но значительно более крупных размеров, укрепленных на надежных опорных изоляторах, и тяжелого общего замыкающего ножа, падающего с такой высоты, чтобы его живая сила могла противостоять электродинамическим усилиям, развивающимся в первый момент замыкания; упавший нож удерживается затем автоматически закрывающимися защелками. Приспособление снабжается электромагнитным спусковым механизмом для дистанционного действия и лебедкой для подъема ножа. Недостатком такого приспособления является возможная неодновременность замыкания фаз вследствие пробоя через воздух до момента соприкосновения ножа с контактами.

Чем бы ни осуществлялось замыкание, не следует допускать нахождение персонала вблизи от замыкающего приспособления в момент его действия, так как возможны выбрасывания масла и газов из масляных баков, разрывы проводников, соединяющих испытываемую машину с замыкающим приспособлением, и другие механические повреждения, а при применении гильотинного

приспособления — ослепляющие вспышки в момент замыкания. Соединительные проводники должны быть надежно укреплены против действия электродинамических усилий; чем они короче и ближе друг к другу, тем лучше, так как тем меньше их активные и индуктивные сопротивления, которые прибавляются к параметрам машины и вносят искажение в результаты испытания.

Применяются два способа включения вибраторов осциллографа, записывающих токи короткого замыкания: через трансформаторы тока и через неиндуктивные шунты.

Неиндуктивный шунт (рис. 3-49) представляет две металлические трубы 1 и 2, вставленные друг в друга с тонкой прослойкой изоляции 3 и с одного

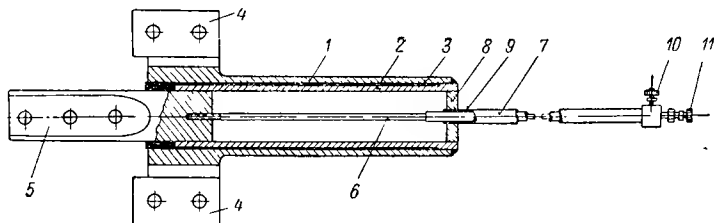


Рис. 3-49. Неиндуктивный шунт.

конца спаянные, а с другого снабженные контактами 4 и 5 для включения в расщелки проводников. Один потенциальный проводник представляет прут 6, ввинченный в дно внутреннего цилиндра 2 по его оси; второй же имеет вид трубки 7, укрепленной одним концом в шайбе 8, впаянной в место соединения внутреннего и наружного цилиндров; первый проводник пропущен сквозь второй и отделяется от него тонкой изоляционной прослойкой 9. На значительном расстоянии от шунта оба проводника заканчиваются зажимами 10 и 11, к которым присоединяется витой двухжильный шнур.

Трансформаторы тока рекомендуется выбирать преимущественно таких типов, которые не имеют стыков в сердечнике; этому условию удовлетворяют обычно все одновитковые трансформаторы тока. Большое удобство представляют трансформаторы тока с несколькими пределами измерения, в особенности когда среди них имеются пределы с отношением 1:4; это позволяет произвести предварительно снятие осциллограммы замыкания при  $\frac{1}{4}$  номинального напряжения на меньшем из этих двух пределов, и если настройка вибраторов оказалась не вполне удачной, то исправить ее соответствующим образом, после чего для снятия осциллограммы замыкания при 105% номинального напряжения перейти на больший из этих двух пределов измерения. В случае неудачи первой осциллограммы, снятой при  $\frac{1}{4}$  номинального напряжения, она может быть повторена без риска нанесения какого бы то ни было ущерба испытываемой машине, так как электродинамические усилия при таком

замыкании по крайней мере в 15—20 раз меньше, чем при 105% номинального напряжения.

От каждого трансформатора тока должна быть произведена подача на осциллограф отдельным двухжильным витым шнуром; применение для этой цели общих многожильных контрольных кабелей или сокращение числа проводников не может быть допущено, так как искажает осциллограмму.

Нередко приходится сталкиваться с мнением, что трансформаторы тока не могут передавать без искажений асимметричную составляющую тока внезапного короткого замыкания, представляющую затухающий постоянный ток. Однако это может относиться только к таким трансформаторам тока, в которых при имеющих место в процессе внезапного короткого замыкания перегрузках наступает заметное насыщение сердечника; в частности, не рекомендуется допускать такие перегрузки для трансформаторов с сердечниками из пермаллоя. Нужно следить также за тем, чтобы сопротивление измерительной цепи было минимально возможным, и особенно не применять длинных соединительных проводников, так как при большой их длине напряжение на зажимах измерительной обмотки, а вместе с ним и магнитный поток в трансформаторе сильно возрастают.

Как правило, шунты включаются со стороны заземленной нейтралю или за короткозамыкающим приспособлением с тем, чтобы до самого момента короткого замыкания вибраторы не находились под напряжением. Однако при испытании машин с низким номинальным напряжением шунты могут включаться и между машиной и короткозамыкающим приспособлением, если изоляция вибраторов допускает безопасную подачу на них более или менее значительного потенциала. Мгновенная перегрузка шунтов может допускаться очень значительной; нужно лишь следить за тем, чтобы установившийся ток короткого замыкания не перегревал шунты до такой температуры, которая опасна для их изоляции. Чем выше номинальное падение напряжения шунта, тем надежнее запись, так как тем в меньшей степени на нее влияют всевозможные поля рассеяния, неплотности контактов, индуктивность потенциальных проводников и т. п.

Чрезвычайно важное значение имеет вопрос о настройке вибраторов, которая должна быть произведена так, чтобы записи не вышли за края ленты, и вопрос об определении масштаба тока.

При применении шунтов настройка производится следующим образом: потенциальные проводники отсоединяются от шунтов и подключаются к зажимам какого-либо практически неиндуктивного сопротивления, величина которого известна; это сопротивление нагружается переменным током, подбираемым так, чтобы падение напряжения на сопротивлении было на 120—

130% больше того, которое ожидается на шунте от одной только симметричной составляющей ударного тока короткого замыкания.

Так как для обработки осциллограммы очень важно, чтобы все три записанных тока имели один и тот же масштаб, световые следы отключенных вибраторов совмещаются, и затем производится настройка их регулирующих сопротивлений так, чтобы все три записи сливались точно в одну, а их размах (двойная амплитуда) не превосходил примерно  $\frac{3}{4}$  ширины ленты. После этого никакие изменения в цепях вибраторов не допускаются; в том числе нельзя пользоваться выключателями на их регулирующих сопротивлениях. Потенциальные проводники переносятся на шунты; желательно проследить, чтобы те проводники, которые были присоединены к одному и тому же зажиму градуировочного сопротивления, оказались одинаково расположенными на шунтах по отношению к машине или к короткозамыкающей перемычке, так как этим будет обеспечено естественное взаимное расположение записей. В заключение световые следы вибраторов раздвигаются на расстояние 10—15 мм друг от друга.

В случае применения трансформаторов тока измерительные линии отключаются от их вторичных обмоток и соединяются последовательно друг с другом, после чего в них подается переменный ток, превосходящий на 120—130% ожидаемую симметричную составляющую ударного тока в измерительных обмотках трансформаторов тока; все дальнейшие операции производятся совершенно так же, как и при работе с шунтами.

Если ожидается настолько значительная мгновенная перегрузка трансформаторов тока, что градуировочный ток превышает предел, на который рассчитаны регулирующие сопротивления вибраторов, приходится подавать измерительные линии на подходящие шунты, падение напряжения с которых подается на вибраторы через последовательно включенные регулирующие сопротивления.

Снятие осциллограмм внезапных коротких замыканий предпочтительно производить с применением кассет, допускающих многократную экспозицию одного и того же отрезка ленты; это позволяет предварительно нанести на ленту нулевые линии всех вибраторов, что облегчает обработку осциллограммы.

Скорость движения ленты может быть определена из следующих соображений: для того чтобы обработка осциллограммы была не слишком затруднительной, один период тока должен занимать не менее 8—10 мм; при частоте 50 гц это дает скорость в 0,4—0,5 м/сек. С другой стороны, даже для самых крупных машин вполне достаточно, чтобы на осциллограмме поместилось 15—20 периодов после внезапного короткого замыкания; таким образом, длина записи получается порядка 150—



200 мм, а так как большинство конструкций осциллографов имеет значительно больший отрезок ленты в кассете для повторной записи, весь процесс может поместиться на таком отрезке и еще остается запас на время между открытием затвора осциллографа и моментом короткого замыкания, позволяющий осуществить автоматическое приведение в действие короткозамыкающего механизма блок-контактами затвора осциллографа, если таковые имеются.

Обычно, кроме трех токов якоря, производится запись тока в цепи индуктора и одного из линейных напряжений (рис. 3-50).

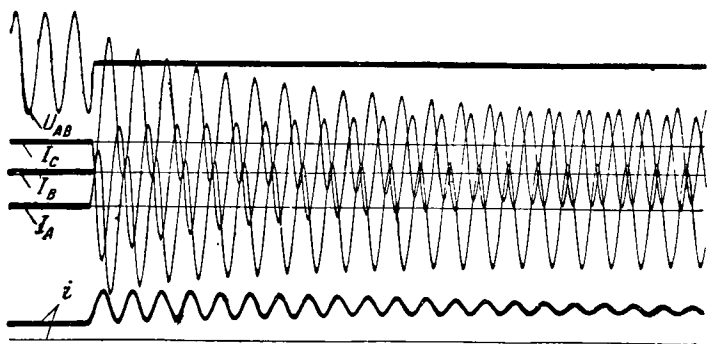


Рис. 3-50. Осциллограмма симметричного внезапного короткого замыкания крупного гидрогенератора.

Последние две записи не используются непосредственно при обработке осциллограммы, но имеют вспомогательное значение: затухание переменной составляющей тока в цепи индуктора позволяет судить о затухании асимметричных составляющих токов якоря, а по кривой напряжения видно, остается ли какое-нибудь напряжение на зажимах машины после короткого замыкания, что очень важно в особенности для крупных машин низкого напряжения; кроме того, частота напряжения до короткого замыкания может быть использована для определения масштаба времени.

Если мощность приводного двигателя едва достаточна для вращения испытываемой машины на холостом ходу, он может быть отключен непосредственно перед моментом короткого замыкания, и тогда процесс протекает на выбеге с постепенно убывающей частотой; однако влияние этого убывания на параметры, определяемые из осциллограммы, весьма незначительно. Впрочем, надобность в отключении двигателя встречается весьма редко; ни для приводного двигателя, ни для источника его питания опыт опасности не представляет.

### 3-26. Обработка осциллограммы внезапного короткого замыкания

Перед началом обработки осциллограммы внезапного короткого замыкания следует произвести ее подготовку, которая состоит в проведении осей и определении масштаба времени.

Если на осциллограмму нанесены нулевые линии самими вибраторами (при применении кассет, допускающих многократную экспозицию), непосредственно воспользоваться ими для обработки осциллограммы нельзя, так как они слишком широки. Поэтому следует не реже чем через каждые 50 мм наметить середину каждой нулевой линии и через эти отметки провести волосные оси; так как светочувствительная лента могла быть заложена в кассету не вполне ровно, а во время фотографической обработки претерпеть деформацию, эти оси могут не быть точно прямыми.

Если кассета осциллографа не допускает повторной экспозиции, для определения осей можно воспользоваться только участками нулевых линий вибраторов до момента короткого замыкания; чтобы экстраполировать эти оси на время после момента короткого замыкания, можно воспользоваться проколами на ленте, которые производят иглы подающего ее механизма. Эти проколы в пределах осциллограммы сохраняют свое расположение по отношению к записям; поэтому можно, тщательно измерив расстояния между проколами и нанесенными участками осей до момента короткого замыкания, наметить затем через каждые 50 мм точки, через которые должны проходить оси. Если же подающий механизм не оставляет на ленте проколов, следует при снятии осциллограммы нанести хотя бы одну линию невключенным вибратором или нулевым зеркалом в стороне от записей и затем, проведя ее ось, измерить расстояние последней от осей нулевых линий на участке до момента короткого замыкания.

Не следует пользоваться для определения положения осей краями ленты, так как последняя может во время движения совершать поперечные перемещения, деформирующие запись.

Определение масштаба времени делается путем измерения длины отрезка  $l$  осциллограммы, заключающего  $N$  периодов напряжения до момента короткого замыкания; тогда масштаб времени будет

$$1 \text{ мм} = \frac{N}{l} \text{ периодов,}$$

или же

$$1 \text{ мм} = \frac{N}{lf} \text{ секунд,}$$

где  $f$  — частота напряжения, измеренная до короткого замыкания.

После этого можно приступить к обмеру осциллограммы. Он состоит из двух операций: определения отрезков времени, протекающих от момента короткого замыкания до каждой вершины кривой тока в каждой фазе, и измерения амплитудных значений токов на протяжении 10—15 периодов — для машин средних мощностей и до 20 периодов — для наиболее крупных машин.

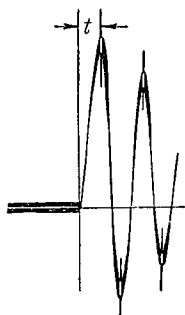


Рис. 3-51. Определение координат времени вершин кривых тока.

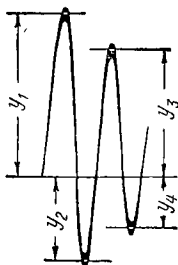


Рис. 3-52. Измерение амплитудных значений тока.

Для определения указанных отрезков времени прежде всего проводится волосная ордината, определяющая момент короткого замыкания. Несмотря на принятие всех возможных мер предосторожности, очень часто между замыканием первых двух фаз и третьей фазы имеется разрыв в 0,001—0,002 сек; однако, несмотря на то, что третья фаза позже вступила в короткое замыкание, отсчет времени для нее начинается от момента, общего с первыми двумя фазами.

Через вершины кривых токов всех трех фаз, ближайшие к моменту короткого замыкания, проводятся тонкие вертикальные штрихи, расстояния которых от момента короткого замыкания дают искомые отрезки времени (рис. 3-51).

Для различных фаз эти отрезки отличаются друг от друга от 0,12 до 0,2 периода, в среднем около  $\frac{1}{6}$  периода; они зависят от взаимного расположения якоря и индуктора в момент короткого замыкания и от соотношения постоянных времени затухания симметричной и асимметричной составляющих тока.

В машинах со слабо выраженным сверхпереходным режимом координаты времени всех последующих вершин кривых токов в каждой фазе могут быть получены прибавлением по 0,5 периода к этим отрезкам; но при сильно выраженном сверхпере-

ходном режиме правильнее будет определить эти координаты обмером по крайней мере для 5—6 ближайших вершин, действуя так же, как и для первых вершин.

Измерение амплитудных значений токов требует предварительного нанесения горизонтальных штрихов, проходящих через середину следа вибратора у каждой вершины; от точности нанесения этих штрихов зависит правильность измерения. За амплитудное значение принимается расстояние между соответствующим штрихом и осью данного тока (рис. 3-52), выраженное в миллиметрах. Расстояния, измеренные вверх от осей, принимаются во всех трех фазах положительными, а вниз от осей — отрицательными.

Все измерения как отрезков времени, так и амплитудных значений следует производить посредством хорошей масштабной линейки с миллиметровыми, а еще лучше — полумиллиметровыми делениями; пользования циркулем и десятичным масштабом нужно избегать, так как иглы циркуля портят осциллограмму, чем затрудняется повторный обмер, если в нем встретится необходимость.

Наблюдение над рядом лиц, занятых обработкой осциллограмм, показывает, что при нормальном зрении и известном навыке точность измерения достигает 0,1 и даже 0,05 мм, что является вполне достаточным.

Применение увеличительных стекол при обработке не дает заметного улучшения, так как вместе с размерами кривых возрастает и их толщина; кроме того, при увеличении линии кажутся более расплывчатыми и нанесение штрихов на них затрудняется.

На этом заканчивается работа на самой осциллограмме.

Следующим этапом обработки является построение огибающих к кривым токов; все измеренные амплитудные значения откладываются на миллиметровой бумаге по координатам времени, в масштабе, увеличенном от 2 до 5 раз, с соблюдением их знаков, и соединяются плавными кривыми по лекалу (рис. 3-53).

Построение огибающих позволяет отделить асимметричную составляющую тока от симметричной; для этой цели производится определение ординат обеих огибающих для моментов времени, начиная от 0,5 периода после короткого замыкания через каждые 0,5 периода на протяжении первых 5—10 периодов, и затем через целый период — до конца осциллограммы. Алгебраическая полусумма ординат верхней и нижней огибающих в любой момент времени представляет асимметричную составляющую тока в этот момент, а их алгебраическая полуразность — амплитуду симметричной составляющей.

В некоторых случаях ординаты обеих огибающих в начальной части процесса могут быть одного знака (рис. 3-54); это

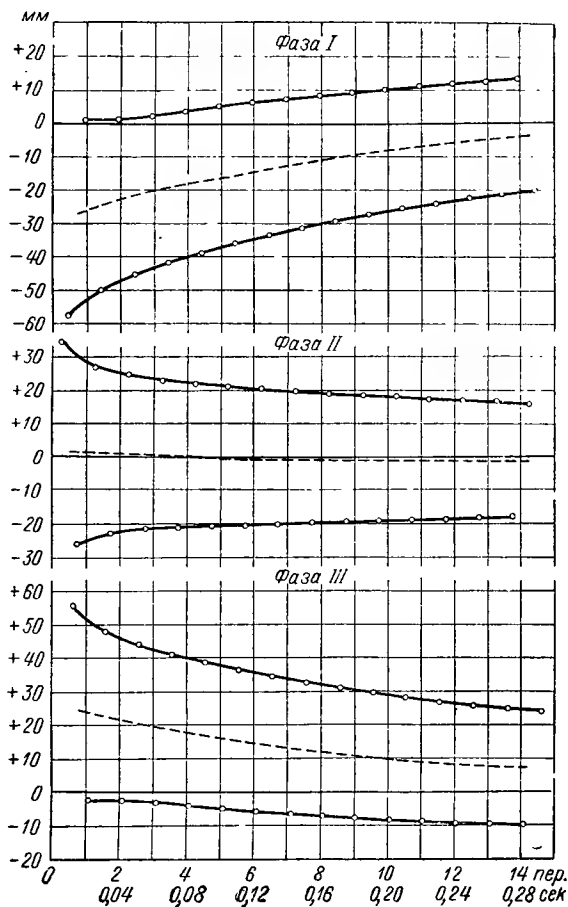


Рис. 3-53 Построение огибающих кривых токов.

имеет место тогда, когда симметричная составляющая затухает значительно быстрее асимметричной, как это видно на нижней части рис. 3-54

В дальнейшем предполагается, что симметричная составляю-

щая тока короткого замыкания не имеет высших гармонических, т. е. может быть выражена уравнением

$$i_k = I_k \sqrt{2} f(t) \sin(\omega t - \psi),$$

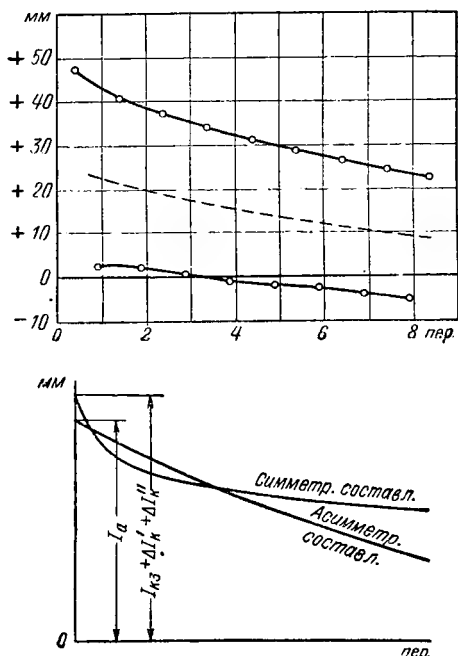


Рис. 3-54. Особый случай начальной части огибающих.

где  
 $I_k \sqrt{2}$  — амплитудное значение симметричной составляющей установившегося тока короткого замыкания;  
 $f(t)$  — сложная непериодическая функция времени, истекшего от момента короткого замыкания, определяющая относительное изменение амплитуды в неустановившемся режиме;  
 $\psi$  — начальная фаза, зависящая от взаимного расположения индуктора и якоря в момент короткого замыкания.

Такое предположение тем ближе к действительности, чем сильнее успокоительные средства индуктора; в частности, в турбогенераторах обычно не удается обнаружить никаких примесей

высших гармонических, но в машинах с явно выраженными полюсами без успокоителей и с расслоенными полюсными башмаками наличие высших гармонических очень заметно, особенно в начале процесса.

Предположение об отсутствии высших гармонических позволяет считать действующие и наибольшие (амплитудные) значения токов всегда находящимися в одном и том же соотношении; это важно потому, что при определении масштабов измерительные приборы дают действующие значения, в то время как обмеру на осциллограммах подвергаются наибольшие значения.

Согласно теории процесса внезапного симметричного короткого замыкания, симметричная составляющая тока рассматривается как состоящая из трех частей: неизменного установившегося тока короткого замыкания  $I_k$ , затухающего тока переходного режима с начальным значением  $\Delta I'_k$  и быстро затухающего тока сверхпереходного режима с начальным значением  $\Delta I''_k$ .

Задачей следующего этапа обработки осциллограммы является разделение этих составляющих.

С этой целью по характеристике установившегося симметричного короткого замыкания определяется первая из этих составляющих —  $I_k$ ; ее действующее значение, соответствующее данному току возбуждения и выраженное в амперах, по масштабу тока переводится в миллиметры амплитудных значений осциллограммы и вычитается из всех значений симметричной составляющей, вычисленных при обработке построения огибающих.

Остатки от этого вычитания строятся на полулогарифмической бумаге, которая располагается так, что по оси абсцисс с равномерной шкалой откладывается время, истекшее от момента короткого замыкания (в периодах или секундах), а по оси ординат с логарифмической шкалой — численные величины остатков. Если через нанесенные таким путем точки провести плавную линию, то она вначале будет кривой, обращенной выпуклостью вниз, а затем переходит в наклонную прямую (рис. 3-55). Экстраполяция этой прямой на момент короткого замыкания дает начальное значение составляющей переходного режима  $\Delta I'_k$ , а разности между нею и кривой — составляющую сверхпереходного режима.

Чтобы определить начальное значение составляющей сверхпереходного режима  $\Delta I''_k$ , нужно отложить эти разности на той же полулогарифмической бумаге и экстраполировать их на момент короткого замыкания. Как правило, первые 3—4 точки хорошо укладываются на прямую; только они и должны приниматься во внимание для экстраполяции.

Согласно определению понятия о синхронном реактивном сопротивлении по продольной оси,

$$x_d = \frac{E_x}{I_k},$$

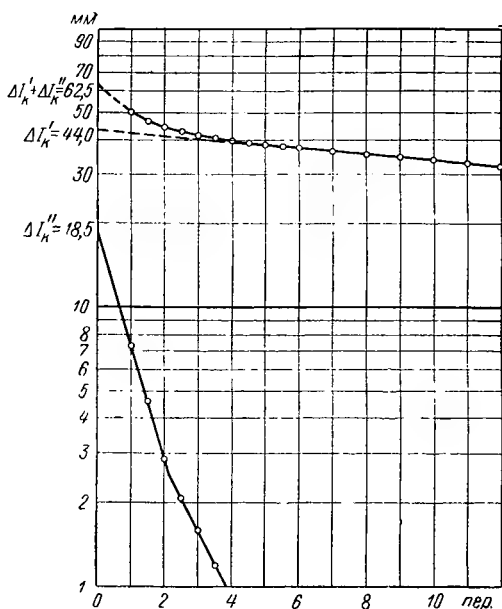


Рис. 3-55. Определение начальных значений составляющих сверхпереходного и переходного режимов.

где  $E_x$  есть фиктивная фазовая э. д. с., взятая по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода соответственно току возбуждения.

Поскольку переходное реактивное сопротивление по продольной оси  $x_d'$  рассматривается как начальное значение  $x_d$  при переходном режиме, оно должно определяться аналогичной формулой, но вместо тока установившегося короткого замыкания  $I_k$  в ней должна стоять сумма этого тока и начального значения составляющей переходного режима  $\Delta I_k'$ :

$$x_d' = \frac{E_x}{I_k + \Delta I_k'}.$$



Аналогичным образом сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси  $x'_d$ , рассматриваемое как начальное значение  $x'_d$  при сверхпереходном режиме, должно определяться суммой установившегося тока  $I_k$ , начального значения составляющей переходного режима  $\Delta I'_k$  и начального значения составляющей сверхпереходного режима  $\Delta I''_k$ :

$$x'_d = \frac{E_x}{I_k + \Delta I'_k + \Delta I''_k}.$$

Таким образом, для того чтобы определить переходное и сверхпереходное реактивные сопротивления по продольной оси на основании результатов обработки осциллограммы, нужно перевести из миллиметров в амперы экстраполированные значения составляющих  $\Delta I'_k$  и  $\Delta I''_k$  и по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода найти фиктивную э. д. с.  $E_x$ , соответствующую току возбуждения до момента короткого замыкания.

Однако в действительности все это обстоит так лишь при настолько пониженном напряжении до момента внезапного короткого замыкания  $U_0$ , что характеристика холостого хода в части, определяющей  $E_x$ , практически не отличается от прямой линии. В этих условиях значения реактивностей  $x'_d$  и  $x''_d$ , определенные по вышеуказанным формулам, не зависят от насыщения и носят название ненасыщенных значений этих параметров.

Но при повышении напряжения  $U_0$  начинает обнаруживаться действие двух факторов: во-первых, вследствие насыщения величина тока возбуждения, потребного для создания э. д. с., покрывающей реактивное падение напряжения в обмотке, перестает быть пропорциональной соответствующим значениям  $E_x$ ; во-вторых, потоки рассеяния, создаваемые возрастающими с напряжением токами, становятся настолько значительными, что вызывают заметное насыщение своих путей, вследствие которого сами эти токи соответственно возрастают.

Если бы имело место действие только первого из этих факторов, то значения параметров  $x'_d$  и  $x''_d$ , определенные по напряжению  $U_0$  до момента внезапного короткого замыкания и по полученным из эксперимента токам  $I_k + \Delta I'_k$  и  $I_k + \Delta I'_k + \Delta I''_k$ , сохраняли бы практически неизменные значения:

$$x_d = \frac{U_0}{I_k + \Delta I'_k};$$

$$x''_d = \frac{U_0}{I_k + \Delta I'_k + \Delta I''_k}.$$

Однако влияние второго из упомянутых факторов приводит к тому, что значения, подсчитанные таким образом, не остаются неизменными, но убывают с увеличением напряжения  $U_0$ ; они носят название *насыщенных значений* этих параметров.

Как общее правило, понижение насыщенных значений параметров, в особенности сверхпереходного реактивного сопротивления  $x''_d$ , с увеличением напряжения  $U_0$  более заметно в машинах с неявновыраженными полюсами. Согласно многочисленным экспериментам это понижение при номинальном напряжении может достигать в машинах с явновыраженными полюсами 10—12%, а в машинах с неявновыраженными полюсами — 15—25% ненасыщенного значения.

Для надежного получения ненасыщенных значений  $x'_d$  и  $x''_d$  следует производить опыт внезапного короткого замыкания при напряжении, не превосходящем  $1/4$  номинального; насыщенные значения, напротив, получаются из опытов, произведенных при напряжении не ниже номинального.

Нахождение экстраполированных значений  $\Delta I'_k$  и  $\Delta I''_k$  можно вести для тока каждой фазы в отдельности; тогда различные неточности, допущенные при снятии осциллограммы и ее обработке, могут привести к тому, что вычисленные значения  $x'_d$  и, в особенности,  $x''_d$  будут несколько отличаться друг от друга; за действительные их значения в этом случае нужно принять средние арифметические из вычисленных.

Однако можно поступить и несколько иначе. После того, как в каждой фазе произведено разделение тока на симметричную и асимметричную составляющие, определяются средние арифметические значения симметричной составляющей для каждого момента времени; из них вычитается значение установившегося тока короткого замыкания и производятся все дальнейшие операции, описанные выше. Этим достигается экономия времени в графических построениях на полулогарифмической бумаге и сглаживается влияние различных случайных ошибок, так что через нанесенные точки гораздо легче провести плавные линии.

Но асимметричные составляющие во всех трех фазах различны, и потому их начальные значения должны быть определены для каждой фазы отдельно. Эта операция делается также путем нанесения вычисленных значений асимметричной составляющей на полулогарифмическую бумагу. Только самая начальная часть нанесенных точек, хорошо укладывающаяся на прямую, должна приниматься во внимание при экстраполяции; обычно уже вскоре точки сильно отходят от этой прямой (рис. 3-56); кроме того, из этого графика видно, что наклон прямых во всех фазах различен.

Оставляя в стороне неточности построения, способные вызвать такое отклонение, основную причину его нужно усматривать в общих чертах в следующем: затухание асимметричной составляющей происходило бы точно по закону показательной

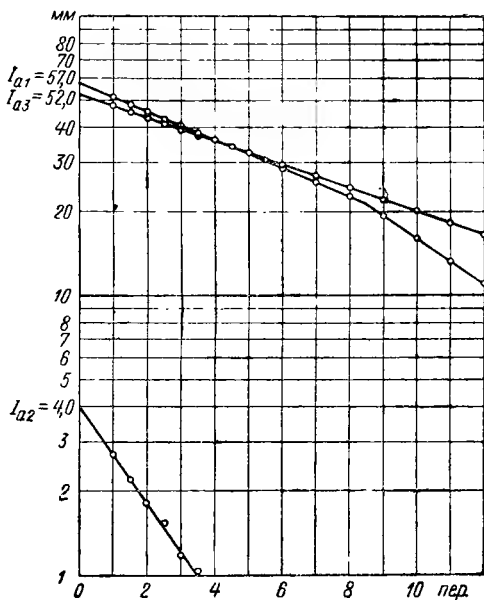


Рис. 3-56. Определение начальных значений асимметричных составляющих.

функции, изображающейся в полулогарифмических координатах в виде наклонной прямой, только если бы обмотка якоря обладала исчезающе малым активным сопротивлением. В действительности же закон затухания близок к показательной функции в начальной части процесса, а в дальнейшем принимает вид быстро затухающих колебаний с относительно большим периодом (рис. 3-57). Изменение знака асимметричной составляющей нередко явственно обнаруживается при разделении токов на составляющие.

По трем начальным значениям асимметричной составляющей, полученным экстраполяцией, следует определить наибольшее возможное значение этой составляющей, которое будет иметь место, если короткое замыкание совершается в момент,

когда в данной фазе напряжение проходит точно через нулевое значение.

Для этой цели применяется следующее построение (рис. 3-58): три начальные значения асимметричной составляющей, полученные экстраполяцией, наносятся в виде векторов, наклоненных друг к другу под углами  $60^\circ$ , причем в середине должен быть самый больший из них; через конец каждого вектора проводится перпендикуляр к данному вектору. Три перпендикуляра, пересекаясь, образуют треугольник, который тем меньше, чем тщательнее произведен сам опыт и его обработка. Вектор, проведенный из полюса в центр этого треугольника, дает по величине искомую наибольшую возможную асимметричную составляющую  $I_a$ .

Согласно теории неуставившихся процессов, наибольшая возможная начальная асимметричная составляющая

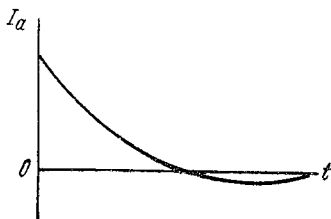


Рис. 3-57. Затухание асимметричной составляющей.

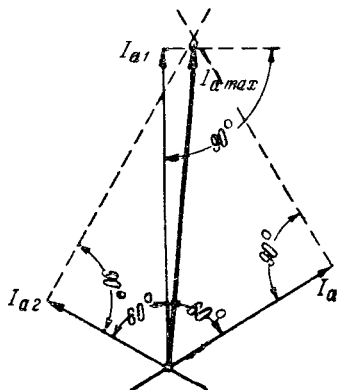


Рис. 3-58. Определение наибольшего возможного начального значения асимметричной составляющей.

равна по величине начальному значению амплитуды симметричной составляющей. Таким образом, сверхпереходное реактивное сопротивление может быть определено не только по симметричной, но и по асимметричной составляющей.

Здесь следует обратить внимание на одно обстоятельство: масштаб тока выражается в амперах действующего значения, хотя измерению в линейных мерах на осциллограмме подвергаются мгновенные — на и б о л ь ш и е значения. Между тем асимметричная составляющая, как всякий постоянный ток, выражается в амперах мгновенного значения. Следовательно, снятый масштаб тока имеет для асимметричной составляющей иное значение, чем для симметричной: каждый его миллиметр равен в  $\sqrt{2}$  раз большему числу ампер. Но как в линейных мерах на осциллограмме, так и в амперах начальное мгновенное значение симметричной составляющей и наибольшее

возможное начальное значение асимметричной составляющей равны друг другу; поэтому, переводя асимметричную составляющую из миллиметров в амперы только для вычисления  $x_d''$ , нет никакой надобности изменять масштаб в  $\sqrt{2}$  раз, но зато не нужно вводить  $\sqrt{2}$  и в формулу для вычисления  $x_d''$ ; таким образом,

$$x_d'' = \frac{U_0 [\delta]}{I_a [м.м.] \times \text{масштаб тока } [а/м.м.]}$$

Электродинамические усилия, возникающие в лобовых частях обмотки якоря при внезапном коротком замыкании, определяются совместным действием мгновенных значений симметричной и асимметричной составляющих и достигают наибольшей величины вместе с их суммой. Но наибольшее значение тока наступает спустя примерно  $1/2$  периода (в действительности немного меньше) после момента короткого замыкания; за это время как симметричная, так и асимметричная составляющие успевают уже довольно сильно затухнуть, так как скорость убывания их на этом участке очень велика. Поэтому в образовании наибольшего электродинамического усилия принимает участие не сумма начальных мгновенных значений каждой из них в отдельности, но величина заметно меньшая, которая может быть определена суммированием: а) сверхпереходной составляющей, б) переходной составляющей, в) тока установившегося короткого замыкания и г) наибольшей возможной асимметричной составляющей, причем учитываются их значения по истечении 0,5 периода с момента короткого замыкания.

Первые два слагаемые могут быть взяты прямо из графика в полулогарифмических координатах (рис. 3-59); третье является величиной неизменной для всех моментов времени; что же касается четвертого, то его определение встречает некоторое затруднение. Начальное значение асимметричной составляющей  $I_a$  равно сумме начальных значений первых двух слагаемых  $\Delta I_k' + \Delta I_k''$ , и третьего  $I_k$ ; эту сумму следует отложить на оси ординат по логарифмической шкале (точка А). Но в каждой фазе асимметричные составляющие затухают с иной скоростью, и наклон прямых, изображающих их в этих координатах, различен; осторожности ради следует принять, что наибольшая возможная асимметричная составляющая затухает с наименьшей скоростью из всех наблюдаемых, для чего через точку А проводится прямая с наименьшим наклоном, по которой и может быть определено искомое четвертое слагаемое.

Остается перевести полученную сумму, выраженную в линейных мерах осциллограммы, в амперы, умножив ее на масштаб тока; но так как последний выражен в действующих значениях, то для получения мгновенного значения результат следует умножить еще на  $\sqrt{2}$ .

Осциллограмма внезапного короткого замыкания позволяет определить постоянные времени затухания симметричных составляющих по продольной оси — сверхпереходной  $T_d''$ , переходной  $T_d'$  и асимметричной составляющей  $T_a$ .

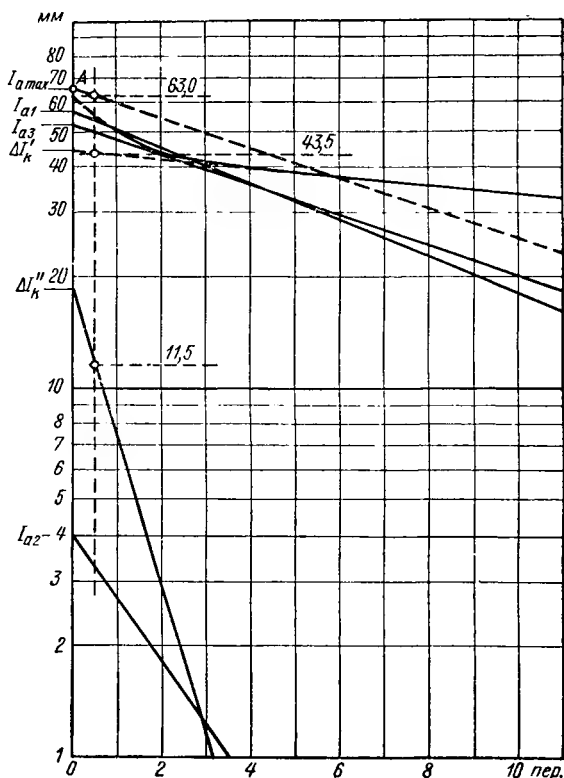


Рис. 3-59. Определение наибольшего возможного мгновенного значения тока внезапного короткого замыкания.

В основу этого определения кладется понятие о затухающей величине, подчиняющейся закону

$$A = A_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}},$$

где  $A$  — текущее и  $A_0$  — начальное значение затухающей величины;  $\varepsilon = 2,718...$  — основание системы натуральных логариф-

мов;  $t$  — текущая координата времени;  $T$  — искомая постоянная времени затухания.

Если положить  $t = T$ , то

$$A = A_0 e^{-1} = \frac{A_0}{e} = 0,368 A_0.$$

Следовательно, значение затухающей величины, равное  $\frac{1}{e}$  доле, или 0,368 от начального, соответствует координате времени  $t = T$ ; таким образом, вычислив эту долю начального значения затухающей величины, достаточно определить соответствующую ей координату времени, которая и будет численно равна искомой постоянной времени (рис. 3-60).

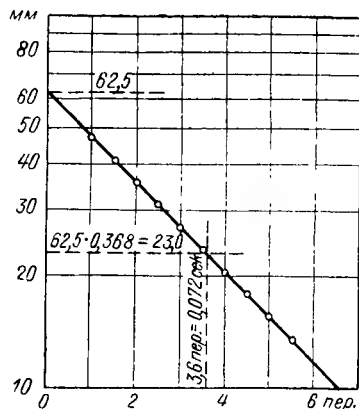


Рис. 3-60. Графическое определение постоянной времени.

Если закон затухания нарушается до истечения этого времени, что при изображении в полулогарифмических координатах выражается переломом прямой, представляющей данную затухающую величину, то следует продлить начальную прямолинейную часть настолько, чтобы отложить 0,368 от начального значения затухающей величины на этом продолжении.

**Пример.** В результате обработки осциллограммы внезапного короткого замыкания турбогенератора мощностью 6000 квт, 7500 ква с номинальным напряжением  $U_n = 6300$  в, произведенного при 105% номинального напряжения, т. е. при 6615 в, установлено, что амплитуда начального значения сверхпереходной составляющей  $\Delta I'_k$  имеет 6,8 мм, переходной составляющей  $\Delta I'_k$  — 14,0 мм, а наибольшая возможная асимметричная составляющая достигает 22,4 мм. Масштаб тока для всех трех фаз одинаков; он получен путем осциллографирования установившегося короткого замыкания при токе 948 а с применением многопредельных трансформаторов тока на пределе 1000 а; двойная амплитуда токов всех трех фаз составляла 19,2 мм, после чего трансформаторы тока были переключены на предел 4000 а для осциллографирования процесса внезапного короткого замыкания.

Таким образом, масштаб тока

$$1 \text{ мм} = \frac{948 \cdot 4000 \cdot 2}{1000 \cdot 19,2} = 394 \text{ а (действ.)}.$$

Ток установившегося короткого замыкания, соответствующий по характеристике короткого замыкания тому току возбуждения, при котором произведен опыт, равен  $I_k = 630$  а; следовательно, его амплитуда на осциллограмме должна иметь величину 1,6 мм.

Постоянная времени сверхпереходного режима  $T_d'' = 0,0145$  сек, переходного режима  $T_d' = 0,289$  сек; асимметричные составляющие имеют постоянные времени  $T_{a1} = 0,059$  сек,  $T_{a2} = 0,133$  сек и  $T_{a3} = 0,105$  сек.

Требуется определить наибольший возможный ударный ток при номинальном напряжении.

Для этой цели нужно просуммировать значения всех составляющих тока внезапного короткого замыкания, которые они могут иметь по истечении половины периода после начала процесса, т. е. при промышленной частоте 50 гц — через 0,01 сек после момента внезапного короткого замыкания.

Если известны начальные значения всех составляющих и их постоянные времени, это суммирование может быть произведено графически; но его можно произвести и расчетно.

Прологарифмировав выражение

$$A = A_0 e^{-\frac{t}{T}},$$

получаем:

$$\lg A = \lg A_0 - 0,434 \frac{t}{T},$$

или, подставляя значение  $t = 0,01$  сек

$$\lg A = \lg A_0 - \frac{0,00434}{T}.$$

Таким образом, логарифмы искоемых значений составляющих могут быть получены путем вычитания из логарифмов их начальных значений величины 0,00434, поделенной на соответствующую постоянную времени в секундах.

Логарифмы начальных значений сверхпереходной, переходной и наибольшей возможной асимметричной составляющих равны соответственно: 0,8325; 1,1461 и 1,3503.

Постоянные времени обеих симметричных составляющих установившейся части режима даны в условии; для асимметричной составляющей надо принять наибольшую из трех полученных при обработке, т. е. в данном случае  $T_{a2} = 0,133$  сек.

Результаты деления 0,00434 на постоянные времени равны соответственно: 0,299; 0,015 и 0,0326, откуда логарифмы искоемых значений составляющих будут: 0,5335; 1,1311 и 1,3177, а сами искомые составляющие: 3,416, 13,53 и 20,78 мв.

Остается их просуммировать вместе с амплитудой установившегося тока короткого замыкания:

$$3,416 + 13,53 + 20,78 + 1,6 \approx 39,3 \text{ мв},$$

пересчитать из миллиметров осциллограммы в амперы, умножив на масштаб тока, увеличенный в  $\sqrt{2}$  раз, поскольку результат должен представлять мгновенное значение, а не действующее:

$$39,3 \cdot 394 \cdot \sqrt{2} = 21\,900 \text{ а},$$

и перевести от напряжения опыта к номинальному напряжению (условно — пропорциональным пересчетом):

$$\frac{21\,900 \cdot 6300}{6615} = 20\,900 \text{ а}.$$



### 3-27. Опыт восстановления напряжения при отключении короткого замыкания

Затруднительность проведения опыта внезапного короткого замыкания заставила искать способы замены его другими опытами, более легко осуществимыми и в то же время позволяющими определять те же параметры.

Таким опытом является отключение установившегося симметричного короткого замыкания, при котором производится осциллографирование восстановления одного из линейных напряжений.

Это отключение является таким же внезапным нарушением электромагнитного состояния машины, как и внезапное короткое замыкание; поэтому, если обозначить через  $\Delta U''$  напряжение на зажимах якоря, возникающее в момент отключения тока  $I_k$ , то можно будет написать:

$$x_d'' = \frac{\Delta U''}{I_k \sqrt{3}}.$$

Нарастание напряжения до установившегося значения  $U_0$  происходит по закону, обратному закону убывания суммы токов сверхпереходного и переходного режимов. Если экстраполировать переходную составляющую напряжения на момент отключения, как это делается с переходной составляющей тока, то, обозначив экстраполированное значение через  $\Delta U'$ , можно будет написать:

$$x_d' = \frac{\Delta U'}{I_k \sqrt{3}}.$$

Задача определения величин  $\Delta U''$  и  $\Delta U'$  принципиально может быть решена аналогично задаче разделения начального значения симметричной составляющей тока внезапного короткого замыкания на  $\Delta I_k''$  и  $\Delta I_k'$ , т. е. путем построения в полулогарифмических координатах разности  $U_0 - U$ , где  $U_0$  — установившееся и  $U$  — текущее значение напряжения на зажимах якоря, и экстраполяции прямолинейной части этой разности на момент отключения.

Однако это встречает препятствие потому, что величины  $\Delta U''$  и  $\Delta U'$  малы по сравнению с установившимся напряжением  $U_0$ , а разность их, представляющая сверхпереходную составляющую, и подавно мала; чтобы получить возможность надежного графического разделения, приходится принимать очень большую величину для единицы логарифмической шкалы, что неудобно. С другой стороны, затухание переходной составляющей здесь настолько мало по сравнению со сверхпереходной, что становится вполне возможным производить ее экстраполяцию на мо-

мент отключения по графику, построенному в обычных координатах.

Для того чтобы обеспечить наибольшую возможную точность построения, рекомендуется поступать следующим образом: мас-

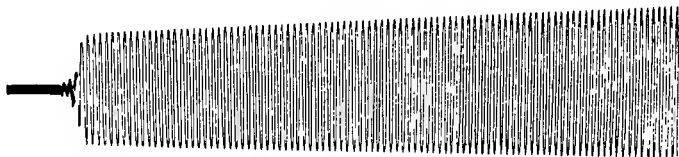


Рис. 3-61. Осциллограмма восстановления напряжения при отключении короткого замыкания.

штаб напряжения на осциллограмме устанавливается так, чтобы напряжение  $\Delta U''$  в первый момент после отключения короткого замыкания давало около половины предельного допустимого отклонения вибратора; так как установившееся напряжение  $U_0$  превосходит  $\Delta U''$  в несколько раз, вибратор должен быть отключен после достижения предельно допустимого отклонения, на что может потребоваться до 0,5 сек. Скорость движения ленты осциллографа при этом может быть взята порядка 0,2—0,4 м/сек, что при частоте 50 гц дает длину периода 4—8 мм.

На рис. 3-61 дан пример такой осциллограммы, а на рис. 3-62 произведено определение напряжений  $\Delta U''$  и  $\Delta U'$  по кривой нарастания напряжения, полученной по обмеру этой осциллограммы, и постоянной времени сверхпереходной составляющей  $T''_{d0}$ , равной промежутку времени, необходимому для уменьшения сверхпереходной составляющей напряжения от первоначального значения  $\Delta U' - \Delta U''$  до 0,368 от этого значения.

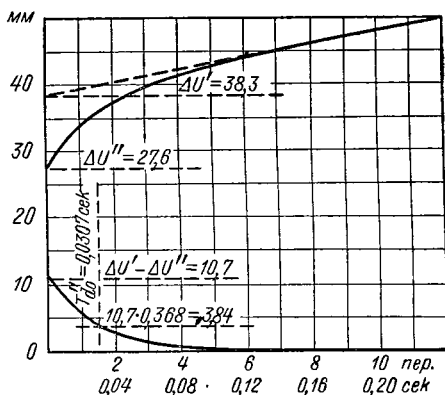


Рис. 3-62. Начальная часть кривой восстановления напряжения.

Однако эта постоянная времени отлична от постоянной  $T''_d$ , получаемой из опыта внезапного короткого замыкания, так как в последнем изменение магнитного состояния машины задержи-

вается действием обмоток как индуктора, так и якоря, в то время как при отключении короткого замыкания обмотка якоря оказывается разомкнутой и потому такого действия не оказывает. В теории параметров синхронной машины доказывается, что между этими двумя постоянными времени существует соотношение

$$T'_d = T_{d0} \frac{x''_d}{x'_d} = T_{d0} \frac{\Delta U''}{\Delta U'}.$$

Что же касается постоянной времени  $T_{d0}$  переходной составляющей, то она не может быть определена из этой осциллограммы, так как пределы ее снятия слишком ограничены. Поэтому снятие осциллограммы приходится повторять, изменив масштаб напряжения так, чтобы его установившееся значение давало отклонения вибратора в допустимых пределах. Одновременно следует уменьшить от 5 до 8 раз скорость движения ленты; снятие осциллограммы может быть прекращено, когда напряжение достигнет примерно  $\frac{3}{4}$  от установившегося значения, на что требуется в наиболее крупных машинах до 10 сек.

Если снятие осциллограммы производится при помощи кассеты с непрерывным движением ленты, то окончательно установившееся напряжение наносится на нее после снятия осциллограммы восстановления; если же кассета допускает повторную экспозицию, то установившееся напряжение может быть нанесено на ту же осциллограмму, но при значительно увеличенной скорости движения ленты — до 2—5 м/сек, что совершенно не затемняет основную осциллограмму.

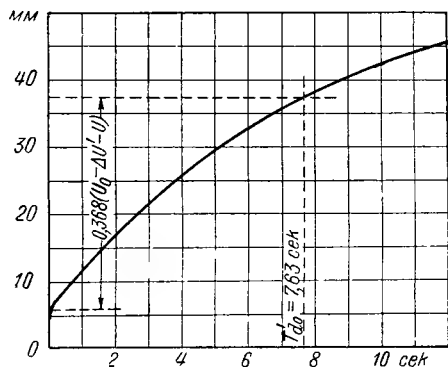


Рис. 3-63. Кривая восстановления напряжения.

получаемой из опыта внезапного короткого замыкания; последняя может быть вычислена из равенства

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_d}{x_d}.$$

За постоянную времени  $T_{d0}$  принимается время, необходимое для уменьшения разности  $U_0 - \Delta U' - U$  (рис. 3-63) до 0,368 ее первоначального значения.

Эта постоянная времени также отличается от постоянной  $T'_d$ , получаемой из опыта внезапного короткого замыкания; последняя может быть вычислена из равенства

получаемой из опыта внезапного короткого замыкания; последняя может быть вычислена из равенства

Однако здесь нельзя заменить отношение реактивных сопротивлений  $x'_d : x_d$  отношением напряжений  $\Delta U' : U_0$ , так как для определения  $x_d$  используется не напряжение  $U_0$ , а фазовая э. д. с.  $E_x$  по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при том же значении тока возбуждения; следовательно, если известна эта последняя, то

$$T'_d = T_{d0} \frac{\Delta U'}{E_x \sqrt{3}}.$$

Опыт восстановления напряжения обладает рядом достоинств по сравнению с опытом внезапного короткого замыкания:

1) он совершенно безопасен для машины и поэтому может быть произведен неограниченное число раз, например, при разных токах;

2) вместо трех кривых токов короткого замыкания снимается только одна кривая напряжения, что облегчает обработку осциллограммы, тем более, что не требует сложных построений;

3) он не нуждается в специальных приспособлениях в виде гильотины, неиндуктивных шунтов, трансформаторов тока с высокими пределами измерений и т. д., что особенно важно для машин, испытываемых на местах установок; отключение установившегося короткого замыкания может быть произведено собственным масляным выключателем машины;

4) при отсутствии масляного выключателя в цепи якоря генератора, как это зачастую имеет место при установке генераторов в блоках с повысительными трансформаторами, короткое замыкание может быть осуществлено за масляным выключателем блока на стороне высшего напряжения трансформатора (рис. 3-64). Наличие в этом случае некоторого начального напряжения на зажимах якоря несколько не снижает правильность опыта; это начальное напряжение просто вычитается из всех измеренных величин.

Наряду с этим опыт не лишен и некоторых недостатков:

1) он не позволяет определить постоянную времени асимметричной составляющей тока внезапного короткого замыкания  $T'_a$ ;

2) точность определения постоянных времени  $T'_d$  и  $T_d$  пересчетом невысока;

3) никакой проверки прочности лобовых частей обмотки якоря опыт не дает.

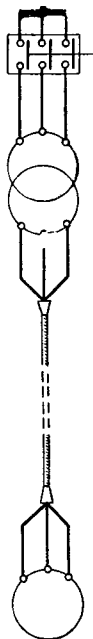


Рис. 3-64. Схема для опыта восстановления напряжения генератора в блоке с трансформатором.

Если сравнивать между собой опыты внезапного короткого замыкания и восстановления напряжения при отключении короткого замыкания, то, подводя итог, можно сказать, что первый из них более пригоден для испытания машины на заводе-изготовителе, в то время как второй — преимущественно на месте установки, особенно для тех случаев, когда трудно осуществить внезапное короткое замыкание без коренной переделки схемы включения машины; на месте установки далеко не всегда оказывается возможным расположить механизм, производящий замыкание, достаточно близко от машины; наличие же длинных соединительных проводников — кабелей, шин и т. д. — вносит заметное искажение в результаты опыта внезапного короткого замыкания, так как к параметрам машины добавляются параметры этих проводников, трудно поддающиеся учету.

### 3-28. Определение сверхпереходных реактивных сопротивлений при неподвижном роторе

Если отсутствие осциллографа не позволяет определить сверхпереходное реактивное сопротивление  $x_d''$  каким-либо из двух описанных выше способов, то можно применить метод питания якоря однофазным током при неподвижном роторе и замкнутом накоротко индукторе. Подробное рассмотрение процессов, происходящих при внезапном коротком замыкании, показывает, что распределение потоков рассеяния якоря и индуктора в обоих случаях одинаково, что и дает основание к применению этого метода.

В зависимости от относительного расположения якоря и индуктора изменяется потокосцепление их обмоток; оно становится наибольшим тогда, когда продольная ось индуктора совпадает

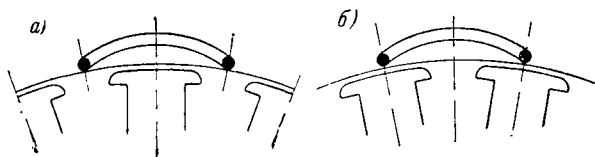


Рис. 3-65. Два предельных случая расположения оси якоря по отношению к осям индуктора: *а* — по продольной оси; *б* — по поперечной оси.

с результирующей осью той части обмотки якоря, на которую подается питание (рис. 3-65, *а*). Реактивное сопротивление машины питающему току при этом принимает значение, которое и является сверхпереходным реактивным сопротивлением по про-

дольной оси  $x_q'$ . Напротив, когда с результирующей осью якоря совпадает поперечная ось индуктора (рис. 3-65, б), потокосцепление обмоток становится наименьшим и реактивное сопротивление принимает значение, равное сверхпереходному реактивному сопротивлению по поперечной оси  $x_q''$ . При промежуточных взаимных расположениях реактивное сопротивление имеет промежуточные значения между этими двумя крайними, плавно изменяясь так, что разность между текущим и средним значениями примерно следует синусоидальному закону.

Промежуточные значения реактивного сопротивления не представляют особого интереса; однако для того, чтобы найти два крайних расположения, приходится вести опыт следующим образом. Где-нибудь на роторе — на конце вала или на ободу, в зависимости от конструкции, — укрепляется стрелка, против которой располагается неподвижная шкала, нанесенная по дуге с центром на оси машины; количество делений этой шкалы произвольно, однако должно быть точно известно, какое их число соответствует одному полюсному делению. Посредством последовательных поворотов ротора на небольшие углы стрелка ставится в различные положения на шкале; в каждом из этих положений производится измерение напряжения  $U$ , приложенного к обмотке якоря, подводенной мощности  $P$  и потребляемого тока  $I$ . Кроме того, в качестве чувствительного индикатора положения следует применить амперметр, включенный в цепь замкнутого накоротко индуктора. При совпадении

оси якоря с продольной осью индуктора ток  $i$  в цепи последнего достигает наибольшего значения; наоборот, при совпадении оси якоря с поперечной осью индуктора он принимает наименьшее значение, которое в турбогенераторах меньше наибольшего в 5—7 раз, а в машинах с явно выраженными полюсами без успокоительных средств обращается практически в нуль.

Рекомендуется строить зависимость потребляемого тока и тока индуктора от угла поворота ротора  $\alpha$ , по которой можно более точно найти положения ротора, соответствующие этим двум случаям взаимного расположения осей. При неизменном

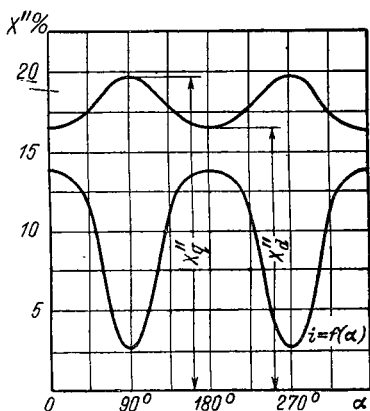


Рис. 3-66. Зависимость реактивного сопротивления  $x''$  и тока индуктора от угла поворота ротора.

приложенном напряжении наибольшее значение тока индуктора соответствует положению для определения  $x_a''$ , а наименьшее — положению для определения  $x_q''$  (рис. 3-66); если же не удастся поддерживать напряжение неизменным, то следует привести измеренные токи пропорциональным пересчетом к какому-нибудь определенному значению напряжения.

После этого надлежит поставить ротор сначала в одно из найденных положений, а затем в другое, и при каждом из них произвести ряд отсчетов, изменяя приложенное напряжение в возможно более широких пределах.

Реактивные сопротивления вычисляются для каждого отсчета по формуле

$$x'' = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{2I^2}.$$

В машинах с явновыраженными полюсами без успокоителей значения реактивных сопротивлений практически не зависят от тока; но при наличии сильных успокоителей, а особенно в турбогенераторах они убывают по мере увеличения тока. Поэтому, если в первых возможно ограничиться самыми небольшими величинами потребляемого тока, то в последних следует доводить его до возможно большей величины; однако предел этому ставит опасность перегрева успокоителей, из-за чего обычно приходится ограничивать ток 20—25% от номинального.

Ток в цепи индуктора при опыте вообще очень мал; хотя непосредственно в определении реактивных сопротивлений он и не участвует, но его измерение дает возможность точно удерживать ротор в необходимые положения, и нежелательно терять эту возможность только из-за того, что при слишком больших токах в якоре обычно применяемые измерительные приборы не допускают измерения тока в индукторе.

Главным затруднением в проведении описанного опыта является необходимость многократно поворачивать ротор на небольшие углы, что при крупных размерах машины требует применения домкратов, кранов и тому подобных приспособлений. В турбогенераторах, имеющих валоповоротное устройство с приводом от электродвигателя, может быть применен такой прием: устройство приводится в действие, и напряжение, ток якоря, ток индуктора, а при наличии вибраторов мощности — и подведенная мощность записываются осциллографом при небольшой скорости движения ленты.

Реактивные сопротивления получаются в результате обработки осциллограммы по масштабам записанных величин на основании отсчетов по включенным приборам при остановленном валоповоротном устройстве; однако этот способ не отличается точностью, особенно в отношении мощности. Вместо

осциллографа могут быть применены регистрирующие приборы с обязательным нанесением отметок времени на все записи.

На случай невозможности осуществления поворота ротора Л. Г. Мамиконян предложил способ определения реактивных сопротивлений  $x_d''$  и  $x_q''$  при неподвижном роторе, основанный на предположении, что отклонение  $\Delta x$  реактивного сопротивления  $x''$  от среднего значения  $x$  в зависимости от угла  $\alpha$  между осями индуктора и якоря подчиняется синусоидальному закону:

$$x'' = x - \Delta x \cos 2\alpha,$$

что довольно хорошо согласуется с опытом; здесь, очевидно,

$$\Delta x = \frac{x_q'' - x_d''}{2};$$

$$x = \frac{x_q'' + x_d''}{2}.$$

Способ состоит в том, что поочередно на каждую пару фаз обмотки якоря подается питание и определяется значение реактивного сопротивления, как описано выше.

Если обозначить три значения  $x''$ , вычисленные для одного и того же значения приложенного напряжения, через  $x_{ab}$ ,  $x_{bc}$  и  $x_{ca}$ , то на основании свойств синусоидальных функций

$$x = \frac{x_{ab} + x_{bc} + x_{ca}}{3},$$

и можно показать, что по абсолютной величине

$$|\Delta x| = \frac{2}{3} \sqrt{x_{ab}(x_{ab} - x_{bc}) + x_{bc}(x_{bc} - x_{ca}) + x_{ca}(x_{ca} - x_{ab})}.$$

После этого уже нетрудно найти искомые параметры:

$$x_d'' = x - \Delta x;$$

$$x_q'' = x + \Delta x.$$

И в этом опыте, особенно в машинах с явновыраженными полюсами, имеющими успокоительные устройства, необходимо измерять ток в цепи замкнутой накоротко обмотки индуктора, так как иначе можно впасть в ошибку при определении знака  $\Delta x$ . Причиной этого является то, что в некоторых машинах, главным образом многополюсных, наблюдается аномальное соотношение реактивных сопротивлений:  $x_d'' > x_q''$ , в то время как для большинства машин, особенно быстроходных,  $x_d'' < x_q''$ . Однако во всех случаях по мере приближения  $x''$  к  $x_d''$  ток в обмотке индуктора возрастает до наибольшего своего значения и, наоборот, по мере приближения  $x''$  к  $x_q''$  ток убывает до своего наименьшего значения, которое в машинах с явновыраженными полюсами может быть исчезающе малым.



Это обстоятельство и дает возможность различать, при каком из трех измерений взаимное расположение осей якоря и индуктора ближе к тому или иному из двух предельных, а следовательно, и судить о знаке  $\Delta x$ .

**Пример.** При определении сверхпереходных реактивных сопротивлений по продольной и поперечной осям крупного гидрогенератора методом поочередного однофазного питания каждой пары фаз обмотки якоря получены следующие результаты:

между выводами C1 и C2  $x_{ab} = 0,980$  ом; ток индуктора  $i = 4$  а;  
 „ „ C2 и C3  $x_{bc} = 0,623$  ом; ток индуктора  $i = 19$  а;  
 „ „ C3 и C1  $x_{ca} = 0,781$  ом; ток индуктора  $i = 14$  а.

Среднее значение реактивного сопротивления

$$x = \frac{x_{ab} + x_{bc} + x_{ca}}{3} = \frac{0,980 + 0,623 + 0,781}{3} = 0,795 \text{ ом.}$$

Абсолютная величина приращения равна:

$$|\Delta x| = \frac{2}{3} \sqrt{x_{ab}(x_{ab} - x_{bc}) + x_{bc}(x_{bc} - x_{ca}) + x_{ca}(x_{ca} - x_{ab})} =$$

$$= \frac{2}{3} \sqrt{0,980(0,980 - 0,623) + 0,623(0,623 - 0,781) + 0,781(0,781 - 0,980)} =$$

$$= 0,207 \text{ ом.}$$

Поскольку в данном опыте наибольшему из измеренных значений реактивного сопротивления соответствует наименьшее значение тока индуктора и наоборот, то соотношение реактивных сопротивлений по продольной и поперечной осям ненормальностей не имеет, и потому приращение  $\Delta x$  положительно; следовательно,

$$x_d'' = x - \Delta x = 0,795 - 0,207 = 0,588 \text{ ом;}$$

$$x_q'' = x + \Delta x = 0,795 + 0,207 = 1,002 \text{ ом.}$$

### 3-29. Определение активного и реактивного сопротивлений обратной последовательности при неподвижном роторе

Описанные выше методы определения сверхпереходных реактивных сопротивлений  $x_d''$  и  $x_q''$  дают возможность попутно определить активное и реактивное сопротивления обратной последовательности  $r_2$  и  $x_2$ .

Реактивное сопротивление, которое встречают токи обратной последовательности, непрерывно изменяется с частотой, двойной по отношению к частоте тока, в зависимости от того, в каком положении находится в данный момент времени индуктор по отношению к обмотке якоря: когда ось обмотки якоря совпадает с продольной осью индуктора, это сопротивление становится наименьшим, а когда оно совпадает с поперечной осью, — то наибольшим.

Эти предельные значения представляют не что иное, как сверхпереходные реактивные сопротивления  $x_d''$  и  $x_q''$ . Отсюда следует, что если известны их величины и известен закон упомянутого изменения мгновенного значения во времени, то не представляет затруднения определить по ним и значение  $x_2$  как среднего за один период.

Если принять, что разность между мгновенным и средним значениями изменяется синусоидально, то среднее значение равно среднему арифметическому из крайних:

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}.$$

Для турбогенераторов это весьма близко к действительности, тем более, что различие между  $x_d''$  и  $x_q''$  в них очень невелико; но для машин с явно выраженными полюсами, в особенности без успокоителей, правильнее принять

$$x_2 = \sqrt{x_d'' x_q''},$$

что дает несколько меньшее значение  $x_2$ .

Ваттметр, включенный в цепь якоря при проведении опыта определения  $x_d''$  и  $x_q''$ , не дает возможности непосредственного определения значения активного сопротивления обратной последовательности  $r_2$  по той причине, что токи в индукторе во время опыта имеют ту же частоту, что и в якоре, в то время как в состав  $r_2$  входит приведенное значение сопротивления индуктора при токах, которые имеют удвоенную частоту и, следовательно, создают иные потери.

Поэтому предварительно по показаниям ваттметра определяются активные сопротивления  $r_2'$  для каждого из опытов, проведенных для определения  $x_d''$  и  $x_q''$ , по формуле

$$r_2' = \frac{P}{2I^2}.$$

Из их средней арифметической вычитается действующее сопротивление обмотки якоря, полученное на основании опыта симметричного короткого замыкания:

$$r_d = \frac{P_k}{3I_k^2}.$$

Разность  $r_2' - r_d$  представляет приведенное значение сопротивления индуктора при той же частоте, что и в якоре; считая, что при массивном индукторе оно изменяется примерно пропорционально квадратному корню из отношения частот, можно будет принять, что при удвоенной частоте в индукторе оно будет в  $\sqrt{2}$  раз больше; но при несимметричной нагрузке машины

половина потерь в индукторе покрывается механическим путем через вал машины, поэтому окончательно:

$$r_2 \approx r_d + \frac{V\sqrt{2}}{2} (r'_2 - r_d) = r_d + \frac{r'_2 - r_d}{\sqrt{2}}.$$

Опыт определения параметров  $r_2$  и  $x_2$  может быть проведен и при трехфазном питании якоря, т. е. из опыта, не отличающегося от опыта короткого замыкания асинхронной машины.

Во время этого опыта измеряются три линейных напряжения, три линейных тока и подведенная мощность. За действительные значения напряжения и тока принимаются средние арифметические из трех измеренных; применяя обозначения, принятые для опыта короткого замыкания асинхронной машины, можно будет написать для полного сопротивления:

$$z_k = \frac{U_k}{I_k \sqrt{3}},$$

а для активного сопротивления:

$$r_k = \frac{P_k}{3I_k^2}.$$

Тогда на основании общих правил реактивное сопротивление

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

С известным приближением можно принять:

$$x_2 \approx x_k,$$

а по-предыдущему

$$r_2 \approx r_d + \frac{r_k - r_d}{\sqrt{2}}.$$

### 3-30. Определение реактивного сопротивления при удаленном индукторе

При подаче трехфазного питания в обмотку якоря, находящегося отдельно от индуктора, реактивное сопротивление обмотки  $x$  будет состоять из двух частей: слагаемого  $x_s$ , определяемого потоками рассеяния поперек пазов, между головками зубцов и вокруг лобовых частей, которое и является искомым реактивным сопротивлением рассеяния при удаленном индукторе, и слагаемого  $x_b$ , определяемого потоком на активной поверхности якоря, создаваемым обмоткой якоря в том пространстве, которое нормально занимает индуктор.

Задачей опыта является определение общего индуктивного сопротивления  $x$  и отделение от него последнего слагаемого:

$$x_b = x - x_s.$$

При опыте измеряются: приложенное линейное напряжение  $U$ , потребляемый линейный ток  $I$  и подведенная мощность  $P$ . На общих основаниях вычисляются:

полное сопротивление одной фазы

$$z = \frac{U}{I\sqrt{3}},$$

ее активное сопротивление

$$r = \frac{P}{3I^2}$$

и реактивное сопротивление

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Для учета слагаемого от потока на активной поверхности якоря применяется формула

$$x_b = \frac{15w^2 k^2 l f \cdot 10^{-8}}{p} [\text{ом}];$$

здесь  $w$  — число витков одной фазы обмотки якоря, соединенных последовательно;

$k$  — обмоточный коэффициент обмотки якоря;

$l$  — полная длина сердечника якоря (включая вентиляционные каналы) в см;

$f$  — частота;

$p$  — число пар полюсов.

Иногда в эту формулу вводится поправка, которая состоит в том, что вместо полной длины  $l$  берется величина

$$l' = l - \frac{1}{2} n_k b_k + \frac{\tau}{6},$$

где  $n_k$  — число и  $b_k$  — ширина вентиляционных каналов, а  $\tau$  — полюсное деление; все эти размеры должны быть выражены в сантиметрах.

Однако правильное определять  $x_b$  опытным путем. Для этой цели на активной поверхности якоря укладывается контрольная катушка, длина которой равна полной длине сердечника якоря, а ширина — полюсному делению. Активные стороны этой катушки укрепляются над клиньями пазов, а лобовые должны быть оттянуты растяжками по радиусам к оси машины в плоскостях, ограничивающих пакет сердечника статора (рис. 3-67) с тем, чтобы предохранить их от влияния потоков рассеяния вокруг лобовых частей обмотки. В машинах обращенного исполнения (с вращающимся якорем) приходится укладывать лобовые части катушки по краям пакета сердечника якоря.

К контрольной катушке присоединяется вольтметр, по возможности с более высоким сопротивлением,

Если обозначить через  $w_k$  — число витков контрольной катушки и через  $U_k$  — измеренное на ней напряжение, то реактивное сопротивление обмотки якоря  $x_b$ , определяемое потоком на активной поверхности якоря, будет равно:

$$x_b = \frac{U_k}{I} \frac{wk}{w_k}.$$

В тех случаях, когда якорь имеет дробное число пазов на полюс и фазу  $q$ , не представляется возможным расположить контрольную катушку так, как было описано, поскольку полюсное деление не кратно шагу паза; если одна активная сторона контрольной катушки с шириной, равной полюсному делению, уложена на поверхность клина одного из пазов, то другая приходится на зубец или на границу между зубцом и пазом. Тогда можно сделать ширину катушки равной наибольшему целому числу пазов  $Q'$ , заключающемуся в полюсном делении, и учесть это введением в написанную выше формулу поправочного множителя

$$x_b = \frac{U_k}{I} \cdot \frac{wk}{w_k \sin\left(\frac{Q'}{3q} \frac{\pi}{2}\right)},$$

Рис. 3-67. Расположение контрольной катушки в статоре.

где  $q$  есть данное дробное число пазов на полюс и фазу.

Для машин с открытыми пазами якоря как общее реактивное сопротивление  $x$ , так и его составляющая  $x_b$  при всех значениях тока в пределах номинального остаются неизменными; так как предел тока при опыте может быть поставлен только соображениями нагревания обмотки якоря, то безразлично, при каких токах в этом пределе производить опыт — они будут зависеть от тех возможностей, которыми располагает экспериментатор.

С достаточной для большинства практических целей точностью можно считать, что между рабочим реактивным сопротивлением  $x_p$  в диаграмме и реактивным сопротивлением рассеяния при удаленном индукторе  $x_s$  существуют следующие простые соотношения:

для машин с неявновыраженными полюсами

$$x_p \approx x_s;$$

для машин с явновыраженными полюсами

$$x_p \approx x_s + x_b.$$

Этими соотношениями можно пользоваться для построения диаграммы в тех случаях, когда определение  $x_p$  одним из способов, описанных выше в § 3-11, почему-либо не представляется возможным.

### **3-31. Определение скорости нарастания напряжения и предельного напряжения возбудителя**

Развитие современных крупных энергетических систем с особой остротой выдвигает вопрос об устойчивости работы этих систем при различных ненормальных явлениях, происходящих в них, в частности при коротких замыканиях.

Короткие замыкания вызывают понижения напряжения, результатом которых является выпадение из синхронизма как отдельных машин, работающих в системе, так и целых частей системы.

Наиболее действительной мерой борьбы с такими последствиями коротких замыканий является поддержание падающего напряжения системы путем кратковременной, но весьма энергичной форсировки возбуждения всех синхронных машин, работающих в системе.

Для того чтобы форсировка давала требующийся от нее результат, необходимо, чтобы возбудители синхронных машин, особенно крупных, обладали способностью быстрого повышения напряжения до предела («потолка»), более или менее значительно превосходящего номинальное напряжение возбуждения синхронной машины.

Номинальным напряжением возбуждения, согласно ГОСТ 183-55, приложение, п. 8, называется напряжение на зажимах или на контактных кольцах обмотки возбуждения при питании ее номинальным током возбуждения и при расчетной рабочей температуре 75°С — для машин с классом изоляции обмотки возбуждения А и 100°С — для машин с классом изоляции В и выше.

Согласно ГОСТ 183-55, п. 9, скорость нарастания напряжения при холостом ходе возбудителей синхронных генераторов, кроме турбогенераторов и гидрогенераторов, выраженная в долях номинального напряжения возбуждения, должна быть не менее 0,8 в 1 сек; а согласно п. 10 того же стандарта отношение верхнего предела напряжения возбудителя (присоединенного к обмотке возбуждения синхронной машины) к номиналь-

ному напряжению возбуждения синхронной машины для всех синхронных машин, кроме турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, должно быть не менее 1,4. По требованию заказчика это отношение может быть и выше 1,4, но не более 1,8.

Для возбудителей турбогенераторов ГОСТ 533-51 устанавливает относительную скорость нарастания напряжения, равную 2 в 1 сек (п. 16) и двукратное предельное напряжение (п. 14); однако для возбудителей, спроектированных до срока введения этого стандарта, допускается скорость нарастания напряжения только 1,6 в 1 сек и отношение предельного напряжения к номинальному, равное 1,6.

Для возбудителей гидрогенераторов, согласно ГОСТ 5616-50, при мощностях генераторов до 4000 ква включительно скорость нарастания напряжения должна быть не менее 1,3 в 1 сек, а свыше 4000 ква — не менее 1,5 в 1 сек (п. 11); однако для возбудителей, спроектированных до срока введения этого стандарта, допускается скорость нарастания напряжения не менее 0,8 в 1 сек при всех мощностях генераторов.

Отношение предельного напряжения возбудителей гидрогенераторов к номинальному установлено этим стандартом не менее 1,8 при всех мощностях генераторов (п. 9); но для возбудителей, спроектированных до срока его введения, это напряжение допускается не менее 1,3; при этом скорость вращения возбудителя должна быть равна 105% номинальной (п. 34).

В соответствии с ГОСТ 609-54, скорость нарастания напряжения возбудителей компенсаторов должна быть не меньше 2 в 1 сек (п. 9) и отношение предельного напряжения к номинальному напряжению не меньше 2 (п. 8).

При любой системе возбудителя определение предельного напряжения должно производиться при нагрузке возбудителя сопротивлением такой величины, чтобы падение напряжения на нем при номинальном токе возбуждения машины, обслуживаемой данным возбудителем, было равно номинальному напряжению возбуждения этой машины. Этот опыт нельзя совмещать с испытанием на кратковременную перегрузку по току, которое для всех возбудителей с отношением предельного напряжения к номинальному напряжению возбудителя возбуждаемой машины, превышающим 1,6, должно производиться при двойном номинальном токе возбуждения возбуждаемой машины, но при котором напряжение не оговаривается.

Определение предельного напряжения возбудителя производится быстрым приведением органов его регулирования в предельное положение. В частности, если возбудителем является машина постоянного тока, для этого следует закоротить все регулируемые сопротивления в цепи возбуждения (или в цепях возбуждения, если их несколько). В возбудителях с независи-

мым возбуждением от источника постоянного напряжения это последнее предварительно должно быть доведено до своего номинального значения.

Предельное напряжение не требуется выдерживать в течение какого-либо времени; опыт может быть прекращен немедленно после отсчета по всем необходимым приборам.

В отличие от определения предельного напряжения, определение скорости нарастания напряжения возбудителя, согласно ГОСТ 183-55, приложение, п. 26, должно производиться при холостом ходе возбудителя с напряжением, равным номинальному напряжению возбуждения обслуживаемой им машины; если возбудителем является машина постоянного тока, то для этого должно быть произведено замыкание накоротко всех сопротивлений в цепи ее возбуждения (кроме невыключаемых сопротивлений, иногда применяемых для ограничения предельного напряжения возбудителя).

Опыт производится путем осциллографирования кривой нарастания напряжения с обязательным нанесением на осциллограмму отметок времени.

Скорость нарастания напряжения определяется как удвоенное приращение напряжения возбудителя за время 0,5 сек, выраженное в долях номинального напряжения возбуждения, путем такого спрямления кривой нарастания напряжения, чтобы площадь треугольника  $abc$  (рис. 3-68) была равна площади  $abdefa$ ; тогда номинальная скорость нарастания напряжения возбудителя будет определяться отношением  $2\overline{bc} : \overline{Oa}$ .

Если до момента закорачивания сопротивлений в цепи возбуждения возбудителя на его выводах было точно номинальное напряжение возбуждения обслуживаемой им машины  $u_n$ , то отрезки  $\overline{bc}$  и  $\overline{Oa}$  могут быть выражены прямо в миллиметрах осциллограммы без перевода в вольты.

Для спрямления может быть рекомендован следующий прием: участок осциллограммы, соответствующий 0,5 сек от начала процесса, разбивается на  $m = 10 \div 12$  равных частей и во

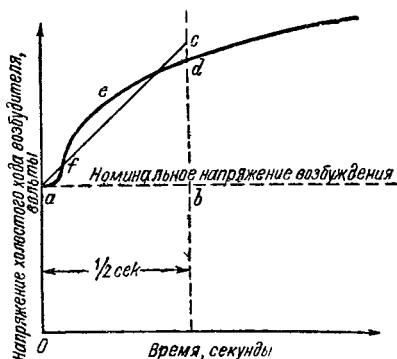


Рис. 3-68. Определение скорости нарастания напряжения возбудителя (извлечение из ГОСТ 183-55, приложение, п. 26).



всех точках деления производится измерение ординат кривой напряжения, отсчитываемых не от нулевой линии последнего, а от значения до начала опыта, т. е. от прямой  $ab$ . Площадь фигуры  $abdefa$ , ограниченной прямыми  $ab$  и  $bd$  и кривой нарастания напряжения, может быть с достаточной точностью вычислена по способу трапеций:

$$F = \frac{1}{2m} \left( y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{m-1} + \frac{1}{2} y_m \right).$$

Эту же площадь должен иметь треугольник  $abc$ ; следовательно, его высота численно равна:

$$\overline{bc} = 4F.$$

Таким образом, окончательная скорость нарастания напряжения получается равной отношению  $8F : u_n$ , где обе величины —  $F$  и  $u_n$  — численно выражены в миллиметрах ординат осциллограммы.

Если до момента закорачивания сопротивлений на выводах возбудителя было напряжение, несколько меньшее номинального напряжения возбуждения  $u_n$  возбуждаемой им машины, то определение номинальной скорости нарастания напряжения следует производить на участке кривой, начинающемся с момента достижения значения  $u_n$ . Практика показывает, что получаемая при этом ошибка незначительна, в особенности если возбудитель имеет независимое возбуждение.

**Пример.** Номинальное напряжение возбуждения синхронной машины, установленное на зажимах возбудителя, дало отклонение вибратора осциллографа на  $u_n = 38,2$  мм. Первые 0,5 сек осциллограммы нарастания напряжения были разбиты на  $m = 10$  частей. Измерение ординат в точках деления дало следующие результаты:

|                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Ординаты              | $y_0$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $y_7$ | $y_8$ | $y_9$ | $y_{10}$ |
| От нулевой линии      | 38,2  | 41,9  | 49,4  | 57,6  | 64,3  | 69,1  | 73,0  | 76,2  | 78,9  | 81,3  | 83,4     |
| От исходного значения | 0     | 3,7   | 11,2  | 19,4  | 26,1  | 30,9  | 34,8  | 38,0  | 40,7  | 43,1  | 45,2     |

Численная величина площади кривой за первые 0,5 сек, считая над уровнем исходного напряжения, равна:

$$F = \frac{1}{2m} \left( y_1 + y_2 + \dots + y_9 + \frac{1}{2} y_{10} \right) =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 10} \left( 3,7 + 11,2 + 19,4 + 26,1 + 30,9 + 34,8 + 38,0 + 40,7 + 43,1 + \frac{1}{2} 45,2 \right) = 13,5.$$

Отсюда скорость нарастания напряжения в относительных единицах равна:

$$\frac{8F}{u_n} = \frac{8 \cdot 13,5}{38,2} = 2,73.$$

### 3-32. Определение постоянных времени со стороны индуктора

Высокая скорость нарастания напряжения возбудителей является важным фактором для поддержания устойчивости работы систем при различных нарушениях нормального эксплуатационного режима; но фактически эта устойчивость определяется быстротой нарастания потоков машин, работающих в данной системе, которая зависит не только от скорости нарастания напряжения возбудителей этих машин, но и от постоянных времени их обмоток.

Выше, в § 3-26 и 3-27, были показаны способы определения постоянных времени по результатам опытов внезапного короткого замыкания и восстановления напряжения при отключении установившегося короткого замыкания и было также отмечено их различие в зависимости от того, в каком состоянии находится обмотка якоря при опыте — замкнута ли она накоротко или разомкнута. Равным образом постоянные времени зависят также и от того, в каком состоянии находится обмотка индуктора — замкнута ли она цепью якоря возбудителя, или гасительным сопротивлением, или, наконец, переменным сопротивлением дуги в случае применения автоматов гашения поля современных систем без гасительного сопротивления.

Однако не всегда удается произвести не только опыт внезапного короткого замыкания, но и опыт восстановления напряжения при отключении короткого замыкания, и приходится обращаться к более легко осуществимым опытам определения постоянных времени со стороны индуктора.

Таковыми опытами являются осциллографические записи процессов гашения поля и так называемого ударного возбуждения, под которым понимается внезапное подключение обмотки индуктора к цепи якоря возбудителя, предварительно возбужденного до того или иного напряжения. Те и другие могут быть произведены как при замкнутой накоротко, так и при разомкнутой обмотке якоря машины.

Всего может быть произведено четыре опыта:

а) ударное возбуждение при замкнутой накоротко обмотке якоря; состояние обмоток соответствует здесь условиям опыта внезапного короткого замыкания, и потому в результате может быть получена известная уже постоянная времени переходного режима  $T_d$ ;

б) ударное возбуждение при разомкнутой обмотке якоря, т. е. в условиях, аналогичных опыту отключения установившегося короткого замыкания, и потому результаты его дают постоянную времени  $T'_{d0}$ ;

в) гашение поля при замкнутой накоротко обмотке якоря; для обмотки статора условия здесь не отличаются от опыта внезапного короткого замыкания, но в цепь обмотки индуктора

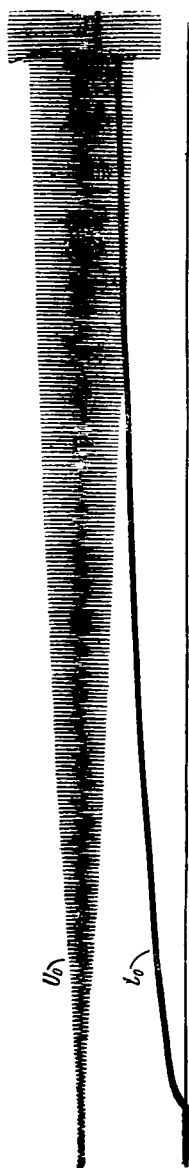


Рис. 3-69. Пример осциллограммы ударного возбуждения с разомкнутой обмоткой якоря.

вводится гасительное сопротивление; если величина его в  $m$  раз больше сопротивления обмотки индуктора, то результат опыта дает величину

$$\frac{T'_d}{m+1};$$

г) гашение поля при разомкнутой обмотке якоря; аналогично предыдущему такой опыт дает величину

$$\frac{T'_{d0}}{m+1}.$$

В принципе из таких опытов могли бы быть определены постоянные времени также и сверхпереходного режима —  $T''_d$  и  $T''_{d0}$ , однако практически их определение встречает еще более значительные затруднения, чем, например, при опыте восстановления напряжения; кроме того, для вопросов устойчивости работы систем большее значение имеют постоянные времени переходного режима.

Опыты гашения поля при помощи автоматов, работающих без гасительного сопротивления, не могут быть использованы для определения постоянных времени.

Во всех случаях осциллографированию подлежит ток возбуждения индуктора; кроме того, в опытах а) и в) производится запись тока короткого замыкания, а в опытах б) и г) — напряжения якоря. При условии достаточной устойчивости скорости вращения машины во время опыта последние две записи могут быть использованы также как отметки времени.

Скорость движения светочувствительной ленты осциллографа для всех этих осциллограмм следует выбирать сравнительно небольшую — порядка 0,1—0,3 м/сек при опытах с разомкнутой обмоткой якоря и 0,2—0,5 м/сек при опытах с замкнутой накоротко обмоткой якоря.

При опытах ударного возбуждения

подлежат записи также установившиеся значения записываемых величин; если осциллограф допускает повторную экспозицию светочувствительной ленты, то установившиеся значения могут быть записаны при сильно увеличенной скорости движения ленты, что совершенно не затемняет основную запись. При записи установившихся значений следует произвести их измерение; тогда эти записи будут служить масштабами.

На рис. 3-69 дан пример типичной осциллограммы ударного возбуждения.

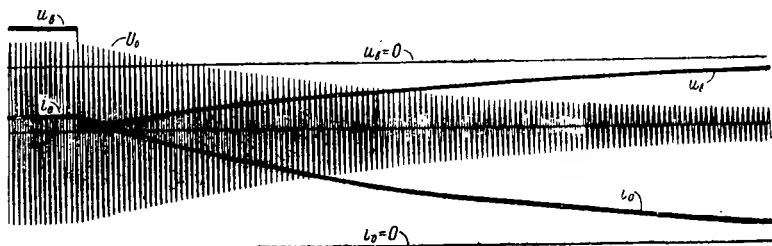


Рис. 3-70. Пример осциллограммы гашения поля с разомкнутым якорем.

При опытах гашения поля масштабами записываемых величин служат их записи непосредственно перед моментом начала гашения, для чего должны быть произведены измерения исходных значений.

На рис. 3-70 дан пример осциллограммы гашения поля.

Обработка записей во всех случаях состоит в измерении мгновенных значений тока возбуждения индуктора и амплитудных значений тока короткого замыкания или напряжения якоря через равные промежутки времени, выбираемые с таким расчетом, чтобы получить 15—20 измерений на промежутке времени от момента начала процесса до момента достижения примерно 0,75 от установившихся значений при опытах ударного возбуждения или 0,25 от исходных значений при опытах гашения поля.

Измеренные значения нет необходимости пересчитывать из миллиметров осциллограммы в амперы или вольты. Для графического определения постоянных времени при гашении поля все величины могут быть отложены в функции времени непосредственно в миллиметрах, причем это удобнее всего делать на полулогарифмической координатной бумаге подобно тому, как и при обработке результатов опыта внезапного короткого замыкания. Что касается опытов ударного возбуждения, то для них все измеренные значения величин следует вычесть из соответствующих установившихся значений и откладывать затем полученные разности в функции времени на полулогарифмической бумаге.

При таких построениях результаты опытов ударного возбу-

ждения и гашения поля при замкнутой накоротко обмотке якоря хорошо укладываются на прямые, и определение постоянных времени производится способом, описанным в § 3-26. Значения постоянных времени, полученные по изменению тока возбуждения индуктора и тока короткого замыкания якоря, обычно достаточно хорошо совпадают, поскольку между этими двумя величинами существует прямая пропорциональность.

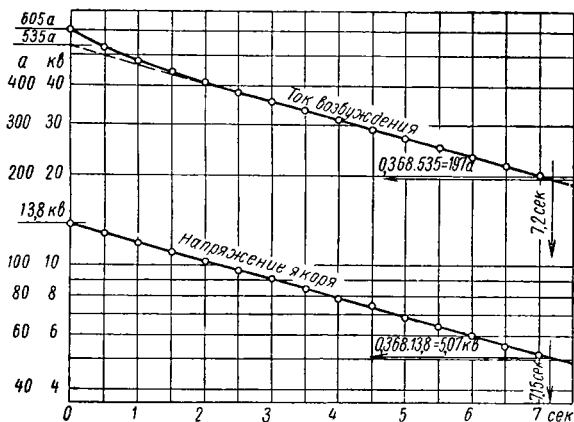


Рис. 3-71. Определение постоянной времени при гашении поля с разомкнутым якорем.

Иначе обстоит дело для опытов, произведенных при разомкнутой обмотке якоря; вследствие насыщения активной стали пропорциональность между током возбуждения индуктора и создаваемым им магнитным потоком, а потому и напряжением якоря соблюдается только при низких значениях тока возбуждения индуктора. Поэтому, если график изменения напряжения якоря, построенный в полулогарифмических координатах, и является обычно практически прямолинейным, то нельзя того же ожидать от графика изменения тока возбуждения индуктора.

При опыте гашения поля, когда записанные на осциллограмме ток возбуждения индуктора и напряжение якоря убывают, это обстоятельство еще не является большой помехой для определения постоянной времени, так как график тока возбуждения индуктора, имеющий в полулогарифмических координатах вначале кривизну, обращенную книзу (рис. 3-71), в дальнейшем переходит в прямую. Экстраполяция этой прямой на момент начала процесса гашения поля дает значение составляющей тока возбуждения индуктора  $i_b$ , идущей на преодоление магнитного

сопротивления зазора между индуктором и якорем; для определения постоянной времени следует умножить на 0,368 именно это значение. В результате постоянные времени, определенные по графикам тока возбуждения и напряжения якоря, хорошо совпадают друг с другом.

Сложнее обстоит дело при опыте ударного возбуждения, когда ток возбуждения и напряжение якоря возрастают, и по-

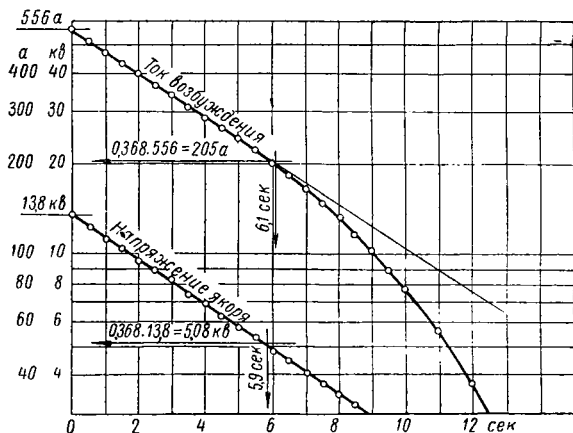


Рис. 3-72. Определение постоянной времени при ударном возбуждении с разомкнутым якорем.

тому в полулогарифмических координатах приходится откладывать убывающие разности между их установившимися и текущими значениями. Если для напряжения якоря график такой разности хорошо укладывается на прямую, то для тока возбуждения следует определить по характеристике холостого хода составляющую  $i_0$ , соответствующую установившемуся значению напряжения якоря, и откладывать в полулогарифмических координатах разность между этой составляющей и текущими значениями тока возбуждения.

Построенный таким способом график имеет вначале прямолинейную часть, по которой и следует определять постоянную времени (рис. 3-72), а в дальнейшем своем течении значительно отклоняется от нее. И в этом случае постоянные времени, определенные по напряжению якоря и по току возбуждения, хорошо совпадают друг с другом. Это дает возможность во всех случаях производить определение постоянных времени по току возбуждения, что удобнее и точнее, чем по напряжению якоря или по току его короткого замыкания,

### 3-33. Особенности испытания машин однофазного тока

Хотя генераторы однофазного тока, как источники для питания промышленных сетей, вышли из употребления, однако для специальных целей, особенно для питания индивидуальных приемников, они встречаются довольно часто, причем как на высокой и повышенной частоте, так и на нормальной промышленной, т. е. 50 гц, и ниже. При частотах примерно до 500 гц они выполняются обычно в прямом исполнении с явно выраженными полюсами, но при более высоких частотах большей частью принимают специальные формы.

В значительном числе случаев генераторы однофазного тока снабжаются обмотками типа обмоток трехфазного тока, в которых одна из фаз отсутствует; несколько реже встречаются машины, имеющие специальную однофазную обмотку.

Синхронные двигатели однофазного тока средних и крупных мощностей в промышленности не встречаются, а при очень малых мощностях находят применение в различного рода сигнальных устройствах и схемах автоматики.

Снятие характеристики холостого хода генератора однофазного тока никакими особенностями не отличается, но единственным видом короткого замыкания однофазной машины является замыкание ее обоих выводов, которое при применении обмоток типа трехфазных без одной фазы эквивалентно замыканию двух фаз трехфазной машины друг на друга.

При снятии этой характеристики могут определяться потери короткого замыкания путем измерения подведенной мощности и отделения от нее механических потерь. Однако эти потери имеют иной состав, нежели потери при симметричном коротком замыкании. Именно, в них появляется отсутствующая там составляющая — потери в полюсных башмаках, успокоительной обмотке и обмотке индуктора от обратно-синхронного поля; это обстоятельство следует иметь в виду при сравнении потерь короткого замыкания машин однофазного тока и машин трехфазного тока.

Если известны данные обмоток якоря и индуктора, то для машин нормальной конструкции может быть расчетным путем определена составляющая  $i_a$  тока возбуждения, уравнивающая реакцию якоря. Для машин с однофазными обмотками это может быть сделано по формуле

$$i_a = \frac{\sqrt{2} \omega k a_2 I}{2 \omega_2 k_2 a_1} = \frac{0,707 \omega k a_2 I}{\omega_2 k_2 a_1},$$

где  $\omega$  — число витков однофазной обмотки,  $k$  — ее обмоточный коэффициент, а прочие обозначения те же, что и в формуле для определения этой составляющей для машин трехфазного тока,

Для машин, хотя и предназначенных для работы в качестве однофазных, но имеющих полные трехфазные обмотки, формула принимает вид:

$$i_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 2w_1 \frac{\sqrt{3}}{2} k_1 a_2 l}{2w_2 k_2 a_1} = \frac{1,225 w_1 k_1 a_2 l}{w_2 k_2 a_1},$$

причем здесь  $w_1$  и  $k_1$  берутся, как для одной фазы трехфазной обмотки.

По остатку от вычитания составляющей  $i_a$  из тока возбуждения короткого замыкания определяется реактивное падение напряжения в обмотке якоря  $Ix_p$ , после чего нет препятствий к построению диаграммы обычным порядком.

Если же данные обмоток неизвестны, то приходится прибегать к снятию нагрузочной характеристики при  $\cos \varphi = 0$  в режиме перевозбуждения, и при ее помощи производить построение диаграммы.

Применение к машинам однофазного тока диаграммы, рекомендованной шведскими нормами, нецелесообразно, так как ввиду отсутствия достаточно обширного опыта нет возможности надежно определить коэффициент увеличения тока возбуждения при коротком замыкании для построения этой диаграммы.

Опыт внезапного короткого замыкания может быть произведен на машине однофазного тока так же, как и на машине трехфазного тока. Однако использование осциллограммы такого внезапного короткого замыкания для получения параметров сверхпереходного и переходного режимов осложняется рядом обстоятельств. Главным из них является то, что форма кривой тока короткого замыкания отличается от синусоиды тем в большей степени, чем слабее действие успокоительной системы, причем эта форма в процессе затухания неустановившегося режима не сохраняется неизменной и может вначале содержать высшие гармонические не только нечетных, но и четных порядков; только в машинах с исключительно сильными (совершенными) успокоителями, как, например, в генераторах ударной мощности, удастся получить синусоидальную форму кривой тока на всем протяжении процесса.

Вторым обстоятельством является то, что величина начального значения асимметричной составляющей тока короткого замыкания зависит от относительного расположения якоря и индуктора в момент внезапного короткого замыкания: она равна нулю, если ось обмотки якоря в этот момент совпадает с поперечной осью индуктора, следовательно, э. д. с. в обмотке якоря достигнет наибольшего значения; наоборот, асимметричная составляющая получается наибольшей в том случае, когда ось обмотки якоря совпадает с продольной осью индуктора, и, следовательно, э. д. с. в обмотке якоря равна нулю,



Поэтому анализ осциллограммы внезапного короткого замыкания с целью получения параметров и постоянных времени может производиться достаточно просто только в машинах с совершенными успокоителями, а в остальных случаях представляет большие трудности и нормально не производится. Для получения сверхпереходных реактивных сопротивлений  $x_d''$  и  $x_q''$  в этих случаях может быть применен описанный в § 3-28 метод питания обмотки якоря при проворачивании ротора; этот же опыт дает возможность определения реактивного сопротивления обратной последовательности  $x_2$ . Кроме того, возможно применение описанного в § 3-27 метода восстановления напряжения при отключении установившегося короткого замыкания.

Характерной особенностью генераторов однофазного тока является искажение формы кривой напряжения при нагрузке, выражающееся в том, что она теряет симметричность относительно середины полуволны вследствие сильно выраженного наличия третьей гармонической, сдвинутой по фазе по отношению к середине полуволны основной синусоиды. Это искажение тем сильнее, чем слабее успокоительная система.

### 3-34. Особенности испытания генераторов с самовозбуждением

За послевоенные годы начали получать довольно широкое распространение синхронные генераторы для мелких стационарных и передвижных электростанций; так как стоимость возбуждателей для таких машин сравнима со стоимостью самих генераторов, то естественно, что заводы-изготовители стремятся пойти по пути создания конструкций без возбуждателей — синхронных генераторов с самовозбуждением. Для этой цели машины, изготавливаемые в обращенном исполнении, снабжаются дополнительной обмоткой якоря, имеющей коллектор и питающей обмотку индуктора, или же, при любом исполнении, возбуждение берется от сухих или вакуумных выпрямителей, питаемых от основной обмотки якоря через специальные трансформаторы; встречается также сочетание того и другого способов возбуждения.

Характерным свойством таких машин является большая величина изменения напряжения, если только для его поддержания не приняты специальные устройства, которые конструктивно могут быть как выполнены отдельными от машины, так и входить в нее неотъемлемыми частями.

Причиной больших изменений напряжения является то, что напряжение цепи возбуждения генерируется тем же магнитным потоком, что и напряжение главной цепи; поэтому реакция якоря, и без того сильно влияющая на напряжение синхронного генератора, здесь получает еще более сильное влияние на него.

Вследствие этого внешняя характеристика такого синхронного генератора по форме напоминает внешнюю характеристику самовозбуждающегося генератора постоянного тока с параллельным возбуждением: при некотором критическом значении сопротивления нагрузки ток достигает наибольшей величины, и дальнейшее уменьшение этого сопротивления уже не ведет к увеличению тока нагрузки, так как напряжение падает дальше быстрее, чем это сопротивление, и характеристика возвращается по направлению к началу координат. Разница лишь в том, что в генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением обычно наибольший возможный ток нагрузки превосходит номинальный в несколько раз, в то время как в самовозбуждающемся синхронном генераторе этот ток не намного превосходит номинальный.

Так как обмотка постоянного тока на якоре очень незначительна сравнительно с обмоткой переменного тока, к тому же создаваемая ею реакция якоря является чисто поперечной и потому мало влияет на магнитное поле машины, практически безразлично — снимать ли характеристику холостого хода при самовозбуждении или при независимом возбуждении; последнее целесообразнее тогда, когда вместе с характеристикой определяются также и потери холостого хода.

Напротив, характеристика короткого замыкания может быть снята только при независимом возбуждении.

Внешние характеристики имеет смысл снимать при самовозбуждении и при независимом возбуждении для выяснения степени влияния самовозбуждения на изменение напряжения; наоборот, регулировочные характеристики, снятые при самовозбуждении и независимом возбуждении, почти не отличаются друг от друга, как и в машинах постоянного тока.

При определении к. п. д. по методу отдельных потерь здесь приходится учитывать, помимо потерь в стали  $P_{ст}$ , механических потерь  $P_{т}$ , потерь в обмотке якоря  $P_{м}$ , добавочных потерь  $P_{д}$  и потерь на возбуждение  $P_{в}$ , каждые из которых определяются обычным путем, еще некоторые дополнительные виды потерь, определяемые конструкцией генератора.

Именно, если генератор имеет обращенное исполнение, необходимо учесть потери в переходном контакте щеток на контактных кольцах  $P_{щ}$ , которые определяются согласно § 3-12.

Если возбуждение подается от основной обмотки якоря через выпрямительное устройство, за ток якоря при определении потерь  $P_{м}$ ,  $P_{д}$  и  $P_{щ}$  должна быть принята геометрическая сумма тока нагрузки  $I$  и тока, поглощаемого выпрямительным устройством; для этого целесообразно измерять не только ток нагрузки  $I$ , но и ток якоря  $I_{я}$ , и потери на возбуждение определяются как мощность, расходуемая в выпрямительном устройстве.

Если же возбуждение подается от отдельной обмотки посто-

янного тока, то потери на возбуждение определяются как произведение напряжения этой обмотки на ток возбуждения с учетом потерь в обмотке постоянного тока и в переходном контакте щеток на коллекторе так, как в генераторах постоянного тока.

### 3-35. Испытание крупных машин на месте установки

В ряде случаев по различным причинам машина не может быть испытана на заводе-изготовителе; тогда ее испытание должно быть произведено на месте установки по окончании монтажа.

Наиболее типичны в этом отношении крупные турбогенераторы, а еще более — гидрогенераторы.

Мощность, требующаяся для приведения их во вращение даже в режиме холостого хода или короткого замыкания, может быть настолько значительной, что в распоряжении завода-изготовителя ее не окажется. Для привода требуется электродвигатель с определенной скоростью вращения, что особенно трудно осуществимо для гидрогенераторов, которые большей частью имеют очень низкие скорости вращения. Кроме того, возникают большие затруднения с установкой очень крупных машин на испытательных стендах, в особенности гидрогенераторов с вертикальным валом, для которых нужно иметь специальные ямы, представляющие вместе со своим оборудованием дорогостоящие и громоздкие сооружения.

Общей особенностью испытаний генераторов на месте установки является то, что приведение машины во вращение не представляет никаких затруднений, но измерение затрачиваемой на это мощности невозможно. Поэтому снятие всяческих характеристик производится обычными методами беспрепятственно, но для определения потерь приходится прибегать к особым методам, как, например, к методу самоторможения.

Министерством электростанций СССР была разработана «Программа обязательных приемо-сдаточных испытаний для турбогенераторов и синхронных компенсаторов с водородным и воздушным охлаждением и гидрогенераторов, устанавливаемых союзными заводами на электростанциях и подстанциях», согласованная с руководством электротехнической промышленности.

Нормально по окончании монтажа на месте установки производится сушка машины, после которой уже проводятся приемо-сдаточные испытания. При этом довольно часто приходится сталкиваться с необходимостью как можно более скорого включения машины под промышленную нагрузку, что вынуждает ограничить предпусковые испытания таким минимумом, который только позволяет считать машину исправной и пригодной для эксплуатации; испытания по полной программе откладыва-

ются до более благоприятного времени и производятся уже после более или менее длительного периода эксплуатации. Достаточной программой таких предпусковых испытаний можно считать следующую (нумерация пунктов согласно «Программе приемо-сдаточных испытаний»):<sup>1</sup>

1. Измерение сопротивления изоляции:

а) каждой фазы или ветви обмотки якоря относительно корпуса и других заземленных фаз с определением коэффициента абсорбции (см. § 1-4);

б) обмотки индуктора (мегомметром на 500—1000 в);

г, з) всех изолированных подшипников;

д) температурных детекторов (мегомметром не выше 250 в);

ж) обмотки якоря возбуждателя относительно корпуса и бандажей и обмотки возбуждения возбуждателя.

3. Испытание изоляции переменным напряжением промышленной частоты:

а) каждой фазы обмотки якоря генератора и синхронного компенсатора относительно корпуса и двух других заземленных фаз;

б) каждой фазы обмотки статора разгонного двигателя синхронного компенсатора (если таковой имеется);

в) обмотки индуктора;

ж) обмотки якоря возбуждателя относительно корпуса и бандажей.

Вне зависимости от испытания на заводе-изготовителе, для турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов на месте установки в обязательном порядке производится испытание изоляции всех обмоток в собранном виде машины напряжением, пониженным до 75% от предписанного стандартом для новых машин; для прочих синхронных машин такое испытание производится по усмотрению заказчика.

Для обмоток, уложенных на месте установки, испытание изоляции производится напряжением той же величины, которая является обязательной для данной обмотки при испытании на заводе-изготовителе.

Если часть обмотки укладывается на месте установки после сборки статора, как, например, на стыках отдельных частей статоров гидрогенераторов, то уложенная на месте часть обмотки до соединения ее с уложенной на заводе должна быть испытана отдельно напряжением в 100%, а затем, после окончательного соединения, вся обмотка подвергается испытанию напряжением в 75% от предписанного стандартом.

Продолжительность испытания во всех перечисленных случаях установлена в 1 мин.

---

<sup>1</sup> Здесь и далее выпущены все испытания, не относящиеся непосредственно к машинам.

4. Измерение сопротивления при постоянном токе:

- а) обмоток якоря пофазно и по ветвям;
- б) обмотки индуктора;
- г) обмотки возбуждения возбуждителя;
- д) обмотки якоря возбуждителя между коллекторными пластинами.

Величины сопротивлений не должны отличаться от измеренных на заводе-изготовителе в пределах точности измерений. Кроме того, сопротивления обмоток различных фаз не должны отличаться друг от друга более чем на 2%.

7. Установка щеток возбуждителя (и подвозбудителя, если он имеется) в нейтральное положение.

12. Определение утечки водорода при номинальном давлении и номинальной скорости вращения (для турбогенераторов и синхронных компенсаторов с водородным охлаждением, если последнее предполагается применить немедленно после пуска).

13. Измерение величины вибрации подшипников генератора и возбуждителя или крестовины гидрогенератора с вертикальным валом с встроенными в нее направляющими подшипниками в трех взаимно перпендикулярных направлениях при подъеме скорости вращения без возбуждения, а также с возбуждением при полной скорости вращения.

Желательно также измерение частоты вибрации и радиального биения контактных колец, коллектора возбуждителя и вала в зоне фланцевого соединения.

Величина вибрации подшипников турбогенераторов и синхронных компенсаторов должна быть не более:

|                                                                  |      |      |          |
|------------------------------------------------------------------|------|------|----------|
| Номинальная скорость вращения, <i>об/мин</i> . . .               | 3000 | 1500 | 1000—600 |
| Вибрация (удвоенная амплитуда колебания),<br><i>мм</i> . . . . . | 0,05 | 0,07 | 0,10     |

Величина вибрации крестовины вертикальных гидрогенераторов с встроенными в нее направляющими подшипниками не должна превышать:

|                                                           |            |         |         |
|-----------------------------------------------------------|------------|---------|---------|
| Номинальная скорость вращения,<br><i>об/мин</i> . . . . . | 62,5—187,5 | 214—375 | 500—750 |
| Вибрация, <i>мм</i> . . . . .                             | 0,18       | 0,12    | 0,10    |

14. Снятие характеристики холостого хода и испытание междувитковой изоляции обмотки якоря согласно нормам ГОСТ 183-55, п. 28.

17. Снятие характеристики симметричного короткого замыкания.

19. Снятие характеристики холостого хода возбуждителя до потолочного значения напряжения.

23. Проверка фазировки (определение чередования фаз).

Помимо перечисленных выше, в полную программу приемосдаточных испытаний входят следующие испытания:

2. Испытание изоляции каждой фазы обмотки якоря относительно корпуса и двух других заземленных фаз выпрямленным напряжением с измерением токов утечки для генератора, синхронного компенсатора и его разгонного двигателя, если таковой имеется.

Величина выпрямленного напряжения составляет при этом 1,2 величины переменного испытательного напряжения для машин с номинальным напряжением до 6600 в включительно и 1,15 величины переменного испытательного напряжения для машин с номинальным напряжением выше 6600 в.

В случае, если в момент проведения предпусковых испытаний на месте установки отсутствует возможность испытания изоляции переменным напряжением согласно п. 3, последнее может быть заменено испытанием выпрямленным напряжением по п. 2.

15. Измерение величины напряжения, остающегося на якоре после гашения поля.

24. Включение способом самосинхронизации со снятием осциллограммы включения для определения кратности тока.

25. Измерение электрического напряжения между концами вала и между стояком подшипника и фундаментной плитой при закороченных масляных пленках шеек вала ротора (только для турбогенераторов и синхронных компенсаторов).

27. Измерение величины вибрации подшипников генератора и возбuditеля в трех взаимно перпендикулярных направлениях при различных нагрузках.

28. Определение нагрева при нагрузках 0,6; 0,75; 0,90 и 1,00 от номинальной и температуре охлаждающей среды не выше номинальной. В случае работы турбогенератора или синхронного компенсатора на воздухе и на водороде эти опыты проводятся при охлаждении воздухом и водородом. В испытания входят измерения температуры обмоток якоря, индуктора, возбuditеля, подшипников, охлаждающего газа и охлаждающей воды, а также проверка коммутации возбuditеля; желательно также измерять количество воды, протекающей через газоохладители.

Кроме того, в качестве желательных в полную программу приемосдаточных испытаний входят:

5. Измерение сопротивления переменному току обмотки якоря для определения сверхпереходных реактивных сопротивлений по продольной и поперечной осям и обмотки индуктора при разомкнутой обмотке якоря для определения кажущегося сопротивления каждого полюса с целью выявления витковых замыканий (последнее только для гидрогенераторов и синхронных компенсаторов).

16. Осциллографирование гашения поля на холостом ходу

при нормальной величине разрядного сопротивления и при закороченном разрядном сопротивлении.

18. Осциллографирование гашения поля при трехфазном коротком замыкании и закороченном разрядном сопротивлении.

20. Определение скорости нарастания напряжения возбуждения.

Помимо перечисленных, в программу приемо-сдаточных испытаний входят пункты, либо не имеющие отношения к машинам (пп. 1, в; 1, е; 3, г; 3, д; 3, е; 3, з; 4, в; 4, е; 4, ж; 8; 11; 21; 22; 26), либо представляющие испытания пооперационного контроля (пп. 6; 9; 10), которые здесь не рассматриваются.

При организации испытаний на месте установки необходимо заблаговременно позаботиться об измерении сопротивления обмотки индуктора в холодном состоянии методом вольтметра и амперметра. Если оно не было произведено до начала сушки, то в дальнейшем, когда машина будет нагрета сушкой, может уже не оказаться возможности его произвести, так как для полного охлаждения крупных машин требуются многие дни. Поскольку от точности этого измерения зависит правильность определения превышения температуры обмотки индуктора, оно должно быть сразу произведено со всей возможной тщательностью, а во избежание всякого рода случайностей следует настоятельно рекомендовать немедленно после измерения изымать из употребления те измерительные приборы, посредством которых оно произведено, с тем, чтобы они не могли быть повреждены до того времени, когда ими же будет производиться измерение сопротивления обмотки индуктора в нагретом состоянии в процессе испытаний на нагревание.

При испытаниях на нагревание самое широкое применение получают температурные детекторы, заложенные в машину при ее изготовлении; это не препятствует встраиванию дополнительно к ним любого количества детекторов (преимущественно термопар) на время испытания.

---

## ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

### ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН

#### 4-1. Программы типовых и контрольных испытаний

Согласно ГОСТ 183-55, п. 35, в программу типовых испытаний асинхронного двигателя входит:

- \*а) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- \*б) измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;
- \*в) определение коэффициента трансформации (для двигателей с фазовым ротором);
- \*г) испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- \*д) испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток;
- \*е) определение тока и потерь холостого хода;
- \*ж) определение тока и потерь короткого замыкания;
- з) испытание при повышенной скорости вращения;
- и) испытание на нагревание;
- к) проверка гарантированных значений коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и скольжения;
- л) испытание на кратковременную перегрузку по току;
- м) определение максимального вращающего момента;
- н) определение минимального вращающего момента в процессе пуска (для двигателей с короткозамкнутым ротором);
- о) определение начального пускового вращающего момента и начального пускового тока.

В программу контрольного испытания входят только пункты, помеченные звездочкой.

Перечень испытаний, охваченных специализированным стандартом ГОСТ 7217-54 «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 0,6 до 1000 кВт. Методы испытаний», вполне соответствует этой программе, отличаясь от нее лишь тем, что содержание пунктов «ж» и «о» программы объединено в один пункт.

Хотя этот стандарт распространен только на двигатели мощностью от 0,6 до 1000 кВт, нет препятствий к тому, чтобы при-



менять излагаемые в нем методы к испытаниям двигателей предельно больших мощностей; что касается двигателей малых мощностей, то, согласно ГОСТ 8212-56, п. 21, для двигателей мощностью от 10 до 600 *вт* методы испытания должны быть указаны в технических условиях на эти двигатели.

Пункты «а», «б», «г», «д» и «з» являются испытаниями, общими для машин всех видов, и лишь часть из них в незначительной степени отличается некоторыми специфическими особенностями, которые и рассматриваются здесь отдельно.

Прочие пункты являются специфическими для асинхронных машин и проводятся методами, составляющими предмет содержания настоящей части книги.

Несмотря на то, что программа построена из расчета испытания двигателей трехфазного тока, она может быть распространена и на двигатели с любым другим числом фаз, в частности на двигатели однофазного тока, а также и на асинхронные генераторы.

#### 4-2. Особенности измерения сопротивлений обмоток

Вопрос об измерении сопротивлений обмоток в синхронных машинах не встречает особых затруднений, так как в подавляющем большинстве случаев обмотка якоря либо снабжается выводами начал и концов всех фаз, либо при глухом сопряжении фаз в звезду по крайней мере выводится наружу нейтраль (нулевая точка). Поэтому сопротивление каждой фазы обмотки якоря может быть измерено в отдельности.

В асинхронных же машинах начала и концы всех фаз обмотки статора снабжаются выводами либо в очень крупных машинах, примерно от 1000 *квт*, либо тогда, когда машина имеет два номинальных напряжения, находящихся в отношении  $1: \sqrt{3}$ , например 220 и 380 *в*, т. е. предназначена для сопряжения фаз и в треугольник, и в звезду. Если же машина имеет только одно номинальное напряжение, то обмотка статора сопрягается обычно наглухо в звезду или, несколько реже, в треугольник и снабжается тремя выводами, между которыми и приходится измерять сопротивление; следовательно, сопротивление каждой фазы в отдельности измерено быть не может.

В случае сопряжения фаз в звезду между каждым двумя выводами при измерении сопротивления оказываются включенными последовательно две фазы, поэтому результат измерения дает сумму их сопротивлений (рис. 4-1).

Пусть  $r_a$ ,  $r_b$  и  $r_c$  представляют действительные значения сопротивлений трех фаз, а  $r_{ab}$ ,  $r_{bc}$  и  $r_{ca}$  — результаты трех измерений, произведенных между соответствующими выводами. Тогда

$$r_{ab} = r_a + r_b;$$

$$r_{bc} = r_b + r_c;$$

$$r_{ca} = r_c + r_a.$$

Решение такой системы уравнений относительно неизвестных  $r_a$ ,  $r_b$  и  $r_c$  дает:

$$r_a = \frac{r_{ca} + r_{ab} - r_{bc}}{2};$$

$$r_b = \frac{r_{ab} + r_{bc} - r_{ca}}{2};$$

$$r_c = \frac{r_{bc} + r_{ca} - r_{ab}}{2}.$$

В частности, если

$$r_{ab} = r_{bc} = r_{ca} = r,$$

то

$$r_a = r_b = r_c = \frac{r}{2}.$$

В случае сопряжения фаз в треугольник между каждым двумя выводами при измерении сопротивления оказываются вклю-

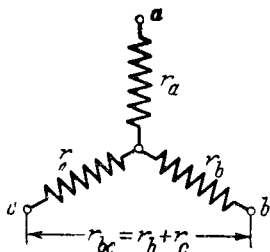


Рис. 4-1. Измерение сопротивления обмотки при глухом сопряжении фаз в звезду.

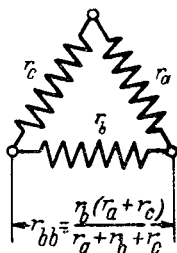


Рис. 4-2. Измерение сопротивления обмотки при глухом сопряжении фаз в треугольник.

ченными параллельно две ветви, одна из которых состоит из одной фазы, а другая — из двух фаз, находящихся в последовательном соединении (рис. 4-02).

Сохраняя для действительных сопротивлений фаз прежние обозначения и называя через  $r_{aa}$ ,  $r_{bb}$  и  $r_{cc}$  сопротивления, измеренные на выводах этих фаз, можно написать:

$$r_{aa} = \frac{1}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b + r_c}} = \frac{r_a(r_b + r_c)}{r_a + r_b + r_c};$$

$$r_{bb} = \frac{1}{\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_a + r_c}} = \frac{r_b(r_c + r_a)}{r_a + r_b + r_c};$$

$$r_{cc} = \frac{1}{\frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_a + r_b}} = \frac{r_c(r_a + r_b)}{r_a + r_b + r_c}.$$

Решение этой системы относительно неизвестных  $r_a$ ,  $r_b$  и  $r_c$  дает:

$$r_a = \frac{1}{2} \left[ \frac{4r_{bb}r_{cc}}{r_{bb} + r_{cc} - r_{aa}} - (r_{bb} + r_{cc} - r_{aa}) \right];$$

$$r_b = \frac{1}{2} \left[ \frac{4r_{cc}r_{aa}}{r_{cc} + r_{aa} - r_{bb}} - (r_{cc} + r_{aa} - r_{bb}) \right];$$

$$r_c = \frac{1}{2} \left[ \frac{4r_{aa}r_{bb}}{r_{aa} + r_{bb} - r_{cc}} - (r_{aa} + r_{bb} - r_{cc}) \right].$$

Если

$$r_{aa} = r_{bb} = r_{cc} = r,$$

то

$$r_a = r_b = r_c = \frac{3r}{2}.$$

Когда машина имеет два номинальных напряжения, находящихся в отношении 1:2, например 3000 и 6000 в, каждая фаза обмотки статора подразделяется на две половины, начала и концы которых снабжаются выводами с тем, чтобы их можно было

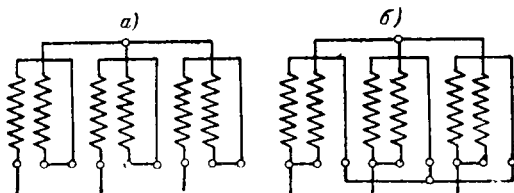


Рис. 4-3. Схема включения обмотки при двух номинальных напряжениях, находящихся в отношении 1:2: а — большее напряжение; б — меньшее напряжение.

соединять друг с другом либо параллельно (для низшего напряжения), либо последовательно (для высшего напряжения). Однако, так как каждый лишний вывод при высоком напряжении представляет добавочное конструктивное затруднение, зачастую производится глухое сопряжение в звезду одних половин фаз, и количество выводов сокращается с 12 до 9 (рис. 4-3).

Особый случай представляют обмотки статоров многоскоростных машин; системы этих обмоток весьма многочисленны. В большинстве такие обмотки конструируются не более чем на два числа полюсов, преимущественно находящихся в отношении 1:2; поэтому машины с числом скоростей более двух снабжаются большей частью двумя обмотками.

Наиболее типичной является схема, при которой двухскоростная обмотка состоит из шести одинаковых частей, соединенных в замкнутую цепь. При большем числе полюсов (низшая

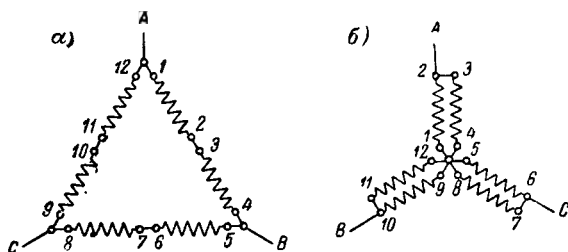


Рис. 4-4. Схема включения обмотки с переключением числа полюсов в отношении 1:2: а — большее число полюсов — треугольник; б — меньшее число полюсов — двойная звезда.

скорость) питание обмотки осуществляется через три равноотстоящие вывода этой цепи; обмотка оказывается сопряженной в треугольник, каждая сторона которого содержит две части в последовательном соединении (рис. 4-4, а). При меньшем числе полюсов (высшая скорость) эти три вывода соединяются друг с другом в нулевую точку, а питание подается через три другие вывода; обмотка оказывается сопряженной в звезду, каждый луч которой состоит из двух частей в параллельном соединении (рис. 4-4, б).

При измерении сопротивления такой обмотки могут встретиться три вида случаев:

а) Измерение производится между соседними по схеме выводами; таких случаев может быть, очевидно, шесть. При них между точками подключения измерительного устройства оказываются включенными две параллельные ветви, одна из которых состоит из одной части обмотки, а другая — из пяти остальных в последовательном соединении.

Полагая, что все шесть частей вполне одинаковы и имеют одну и ту же величину сопротивления  $r$ , нетрудно установить, что измеряемое сопротивление  $r'$  должно быть равно

$$r' = \frac{5r}{6}.$$

б) Измерение производится между выводами, лежащими через один друг от друга; таких случаев может быть также шесть. Между точками подключения оказываются две параллельные ветви, одна из которых содержит две, а другая — четыре части в последовательном соединении. Измеряемое сопротивление должно быть равно

$$r'' = \frac{4r}{3}.$$

в) Измерение производится между выводами, лежащими через два друг от друга, т. е. по диаметру; таких случаев может быть всего три. Обмотка разбивается на две одинаковые параллельные ветви из трех частей в каждой. Измеряемое сопротивление

$$r''' = \frac{3r}{2}.$$

Наибольшие выгоды для измерения представляет третий вид случаев; если при нем наблюдается заметная разница в измерениях, следует разорвать замкнутую цепь в одном месте и произвести измерение сопротивления каждой части в отдельности.

Сопротивление фазы  $R$ , которое должно применяться при определении потерь в обмотке, для низшей скорости вращения равно:

$$R_n = 2r = \frac{12r'}{5} = \frac{3r''}{2} = \frac{4r'''}{3}.$$

Поскольку обмотка представляется сопряженной в треугольник, потери в ней должны вычисляться по формуле

$$P_m = I^2 R_n [вт],$$

где  $I$  — линейное значение тока.

Для высшей скорости вращения сопротивление для подсчета потерь равно:

$$R_v = \frac{r}{2} = \frac{3r'}{5} = \frac{3r''}{8} = \frac{r'''}{3}.$$

Поскольку обмотка является здесь сопряженной в звезду, потери в ней вычисляются по формуле

$$P_m = 3I^2 R_v [вт].$$

Несколько менее распространена схема, представленная на рис. 4-5. При низшей скорости вращения (большее число полюсов) обмотка сопряжена в звезду с последовательным соединением двух частей в каждой фазе. При высшей скорости враще-

ния (меньшее число полюсов) обмотка также сопряжена в звезду, но с параллельным соединением двух частей каждой фазы. При этом питание подключается к точкам соединения двух частей каждой фазы, а концы фаз, служившие для подачи питания при низшей скорости вращения, соединяются вместе, образуя вторую нулевую точку.

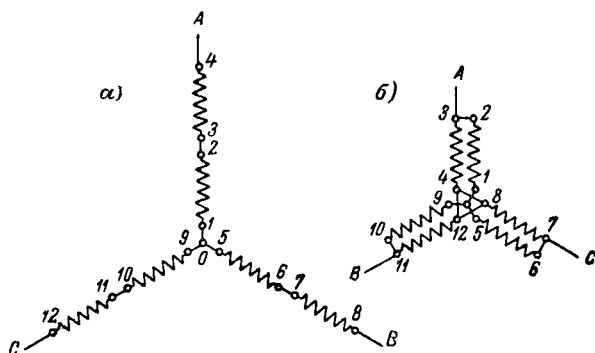


Рис. 4-5. Схема включения обмотки с переключением числа полюсов в отношении 1:2: а — большее число полюсов — звезда; б — меньшее число полюсов — двойная звезда.

Здесь нет смысла рассматривать все возможные случаи измерения сопротивлений между каждым двумя из шести выводов; концы фаз отыскиваются без труда, и сопротивление  $r'$ , измеренное между ними, является удвоенной величиной искомого сопротивления фазы  $R$ :

$$R_{\text{н}} = \frac{r'}{2} = 2r.$$

Отсюда ясно, что сопротивление фазы при высшей скорости вращения, когда последовательное соединение двух ее частей превращается в параллельное, должно быть в четыре раза меньше:

$$R_{\text{в}} = \frac{R_{\text{н}}}{4} = \frac{r}{2} = \frac{r'}{8}.$$

Не представляется возможным рассмотреть все более редко встречающиеся системы двухскоростных, а тем более трех- и четырехскоростных обмоток, так как количество их чрезвычайно велико.

Обмотки роторов обычно сопрягаются наглухо в звезду, реже — в треугольник. Многоскоростные двигатели лишь в

исключительных случаях снабжаются роторами с фазовыми обмотками, имеющими шесть контактных колец и соединенными по одной из описанных схем, обычно же они выполняются с короткозамкнутыми обмотками.

Если обмотка, сопротивление которой подвергается измерению, построена по одному из типов, при которых все ее секции или катушки имеют одинаковые размеры и форму, то измеренные сопротивления фаз не должны существенно отличаться друг от друга; к таким системам относятся все двухслойные обмотки как с диаметральным, так и с укороченным шагом, в том числе и роторные обмотки по типу разрезных волновых обмоток постоянного тока, а также однослойные цепные обмотки во всех их модификациях.

Точность изготовления таких обмоток в среднем обеспечивает отклонение измеренных сопротивлений в пределах 2—3%; более значительные отклонения заставляют предполагать какие-либо неисправности в обмотке.

Однако это не распространяется на обмотки с различными формами и длиной лобовых частей, как, например, двух- и трехъярусные катушечные обмотки, которые хотя и представляют устаревшую форму конструкции, но все же еще встречаются как в статорах, так изредка и в роторах; так как в этих обмотках в различные фазы попадают разные количества катушек того или иного яруса, к ним нельзя предъявлять требование строгого равенства сопротивлений фаз, которые могут довольно заметно отличаться друг от друга. Указать допустимые пределы отклонений сопротивлений было бы здесь крайне трудно; они должны быть тем шире, чем длина машины меньше по сравнению с ее полюсным делением.

При контрольных испытаниях ГОСТ 7217-54, п. 6, допускает однократное измерение каждого сопротивления в случае применения не только способа моста, но и способа вольтметра и амперметра.

### 4-3. Определение коэффициента трансформации

В трансформаторах под коэффициентом трансформации понимается отношение числа витков одной фазы обмотки высшего напряжения к числу витков одной фазы обмотки низшего напряжения; поэтому в них коэффициент трансформации всегда больше единицы. Но в асинхронных двигателях с фазовыми роторами, хотя каждая из двух обмоток — статора и ротора — и имеет нормально вполне определенное назначение, но соотношение их чисел витков или номинальных фазовых напряжений может быть каким угодно; большей частью номинальное напряжение обмотки ротора бывает ниже, чем номинальное напряжение обмотки статора, но в машинах низкого напряжения

встречается и обратное. По этой причине в асинхронных двигателях коэффициент трансформации всегда определяется от обмотки статора к обмотке ротора и может быть как больше, так и меньше единицы.

Далее, в трансформаторах все витки обмотки каждой фазы обычно находятся в последовательном соединении, в то время как в асинхронных двигателях очень часто каждая фаза обмотки статора, а иногда и ротора имеет две или более параллельные ветви; при определении коэффициента трансформации следует принимать в расчет только числа витков, находящихся в последовательном соединении. Кроме того, обмотки статора и ротора отличаются друг от друга не только числами последовательно соединенных витков, но и обмоточными коэффициентами, а в отдельных случаях даже числом фаз (например трехфазные двигатели с двухфазными роторами).

Для опытного определения коэффициента трансформации к обмотке статора при разомкнутой обмотке ротора подводится напряжение и производится измерение линейных напряжений обеих обмоток. Согласно требованиям ГОСТ 7217-54, п. 7, для определения коэффициента трансформации двигателей с номинальным напряжением до 500 в включительно к обмотке статора следует подводить номинальное напряжение, а для двигателей с номинальным напряжением выше 500 в — пониженное напряжение, равное 10—15% номинального.

Правильнее было бы измерять фазовые напряжения; но так как нулевая точка обмотки ротора обычно недоступна, а нулевая точка обмотки статора бывает доступна далеко не всегда, то приходится довольствоваться измерением линейных напряжений обеих обмоток. Для обмотки статора может быть применен вольтметр с переключателем, а для обмотки ротора — вольтметр с игольчатыми щупами.

За действительное значение коэффициента трансформации принимается отношение средних арифметических из измеренных значений напряжения статора и ротора; при этом разности между отдельными измеренными значениями не должны превосходить 1%. Таким образом, опыт определения коэффициента трансформации одновременно является проверкой симметричности фаз обмоток статора и ротора.

Проведение каких-либо иных измерений в этом опыте необязательно; ток, потребляемый двигателем от источника, при этом мало отличается от тока холостого хода, а подводимая мощность не представляет общего интереса по той причине, что состав потерь в этом опыте не является характерным ни для одного из возможных рабочих режимов двигателя.

Определение коэффициента трансформации описанным способом не является строго правильным, так как измеренное его значение несколько отличается от сосчитанного по соотношению



чисел витков и обмоточных коэффициентов. Причина этого состоит в следующем: в то время как напряжение, измеряемое на контактных кольцах ротора, в точности равно э. д. с. в ней, напряжение на зажимах обмотки статора отличается от соответствующей э. д. с. вследствие падения напряжения в обмотке, создаваемого питающим ее током. Это же имеет место и в трансформаторах, но там относительная величина потребляемого тока обычно значительно меньше, поскольку отсутствует явно выраженный зазор в магнитной цепи; если в трансформаторах ток холостого хода при номинальном напряжении нормально составляет всего лишь 6—10% от номинального, то даже в самых крупных асинхронных двигателях он достигает 20—30%, а в более мелких поднимается до 40—50% и выше. По этой причине измеренное описанным способом значение коэффициента трансформации  $K'_T$  оказывается несколько преуменьшенным против расчетного, и тем больше, чем выше приложенное к статору напряжение.

Если почему-либо требуется более точно проверить расчетное значение, то можно воспользоваться таким приемом: опыт повторяется при разомкнутой обмотке статора и при питании обмотки ротора напряжением, составляющим примерно такую же долю ее номинального напряжения, как и при питании обмотки статора; это дает, по аналогичным причинам, преуменьшенное значение коэффициента трансформации  $K''_T$ . Среднее арифметическое или среднее геометрическое из обоих измеренных значений будет весьма близко к расчетной величине:

$$K_T \approx \frac{K'_T + K''_T}{2} \approx \sqrt{K'_T K''_T}.$$

**Пример.** Двигатель с фазовым ротором имеет номинальное напряжение статора при сопряжении фаз в звезду  $U_{H1} = 6000$  в и номинальное напряжение ротора, также при сопряжении в звезду,  $U_{H2} = 850$  в. Для определения коэффициента трансформации обмотка статора была пересоединена в треугольник и к ней приложено напряжение  $U'_1 = 400$  в. При этом между кольцами ротора измерено напряжение  $U'_2 = 96$  в.

Расчетное значение коэффициента трансформации

$$K_T = \frac{U_{H1}}{U_{H2}} = \frac{6000}{850} = 7,06;$$

между тем по измерению

$$K'_T = \frac{U'_1}{U'_2} = \frac{400 \sqrt{3}}{96} = 7,22.$$

Для проверки произведено измерение со стороны ротора, к которому было приложено напряжение  $U''_2 = 120$  в; при этом на статоре измерено напряжение  $U''_1 = 485$  в. Это дает:

$$K''_T = \frac{U''_1}{U''_2} = \frac{485 \sqrt{3}}{120} = 7,00;$$

отсюда действительное значение коэффициента трансформации

$$K_T = \frac{K'_T + K''_T}{2} = \frac{7,22 + 7,00}{2} = 7,11,$$

или же

$$K_T = \sqrt{K'_T K''_T} = \sqrt{7,22 \cdot 7,00} = 7,11.$$

Таким образом, действительный коэффициент трансформации несколько выше расчетного.

#### 4-4. Особенности испытания междувитковой изоляции обмоток

В двигателях с фазовыми роторами испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток должно быть проведено и для обмотки статора, и для обмотки ротора; поэтому, согласно ГОСТ 183-55, п. 28, его необходимо производить в неподвижном состоянии двигателя при разомкнутой обмотке ротора, что можно сделать непосредственно после опыта определения коэффициента трансформации. Для этого приложенное напряжение повышается до 130% номинального и выдерживается в течение 5 мин.

При проведении опыта нужно иметь в виду, что замыкание витков обмотки ротора вследствие пробоя изоляции может служить причиной трогания его с места; однако и при вполне исправной обмотке ротор может иметь склонность вращаться за счет вихревых токов между плохо изолированными друг от друга листами стали сердечника или в стяжных шпильках и т. д.; в этих случаях его приходится притормаживать посредством надетого на вал хомута, лома, просунутого между спицами шкива, и т. п.

В двигателях с короткозамкнутыми роторами обмотка ротора не нуждается в испытании междувитковой изоляции, и испытание распространяется только на обмотку статора; двигатель приводится во вращение, подведенное к нему напряжение повышается до 130% номинального и выдерживается в течение 5 мин.

Если данный двигатель подлежит испытанию при повышенной скорости вращения, то, согласно ГОСТ 7217-54, п. 9, последнее должно предшествовать испытанию междувитковой изоляции обмоток, потому что во время испытания при повышенной скорости вращения изоляция обмотки фазового ротора может быть повреждена действием центробежных сил.

Необходимо упомянуть частный случай, когда требование ГОСТ 183-55, п. 28, не может быть выполнено. В двухполюсных двигателях, преимущественно более крупных мощностей, высота тела ротора значительно уступает высоте тела статора, потому что от нее отнимает слишком большую часть вал, диаметр кото-

рого приходится выбирать не по величине скручивающих напряжений, а по соображениям жесткости.

При работе двигателя тело ротора не получается чрезмерно насыщенным, потому что заметная часть магнитного потока при низкой частоте скольжения проводится валом. Но при неподвижном роторе массив вала вследствие наводимых в нем вихревых токов становится практически неспособным проводить магнитный поток; индукция в теле ротора сильно возрастает, тем более при повышении приложенного к статору напряжения, а еще в большей степени возрастает намагничивающий ток; у подобных двигателей он может уже при номинальном напряжении превосходить номинальное значение. Поэтому испытание междувитковой изоляции обмотки ротора, в отступление от требований стандарта, приходится проводить при разомкнутом роторе, вращаемом при помощи постороннего двигателя против направления вращения поля статора. Если скорость этого вращения равна номинальной, то частота э. д. с., индуктированной в обмотке ротора, будет равна удвоенной частоте питания; следовательно, для того чтобы довести э. д. с. ротора до 130% номинального значения, необходимо будет иметь магнитный поток, равный только 65% соответствующего номинальному напряжению при неподвижном роторе. Таким образом, достаточно подвести к статору только 65% номинального напряжения.

Что касается междувитковой изоляции обмотки статора, то она может быть испытана при вращающемся роторе, замкнутом накоротко, т. е. так же, как это делается в двигателях с короткозамкнутыми роторами. Опыт может быть проведен и при разомкнутой обмотке ротора, вращаемого посторонним двигателем с номинальной скоростью по направлению вращения поля статора.

Если и в этих условиях при повышении напряжения магнитная цепь двигателя настолько насыщается, что намагничивающий ток становится недопустимо велик, то, согласно ГОСТ 183-55, п. 28, можно произвести испытание при повышенной частоте, но не более чем на 15% сверх номинального значения.

Согласно ГОСТ 7217-54, п. 9, испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток многоскоростных двигателей должно быть проведено для каждой номинальной скорости вращения.

#### 4-5. Особенности испытания при повышенной скорости вращения

Асинхронный двигатель, как и всякая другая электрическая машина, требует проверки прочности вращающихся частей против центробежных сил. Однако эта проверка не для всех типов асинхронных двигателей имеет одинаковое значение.

Двигатели с фазовыми роторами имеют на лобовых частях обмотки ротора проволоочные бандажы, пропаянные оловянистым припоем. Припой не увеличивает прочности бандаж, но предотвращает его ослабление и разматывание, и надежность бандаж определяется качеством его пропайки.

По этой причине двигатели с фазовыми роторами по существу требуют сплошной проверки прочности и надежности бандажей путем испытания при повышенной скорости вращения, хотя это и не обусловлено ни одним из действующих стандартов.

Совершенно иначе обстоит дело в отношении двигателей с короткозамкнутыми роторами. Короткие, а иногда и вовсе отсутствующие выступающие концы стержней короткозамкнутой клетки и массивные короткозамыкающие кольца обладают обычно запасом прочности, далеко превосходящим те усилия, которые могут возникнуть в них при номинальной скорости вращения. Поэтому двигатели с короткозамкнутыми роторами не нуждаются в индивидуальной проверке прочности роторной клетки; хотя ни ГОСТ 183-55, ни ГОСТ 7217-54 не содержат соответствующих указаний, можно считать вполне достаточным, чтобы такая проверка была произведена при типовом испытании, и то лишь для того из типов данной серии, характеризующейся одинаковой конструкцией клетки ротора, который имеет наибольшую окружную скорость.

Однако двухполюсные двигатели, в особенности крупные, у которых окружная скорость короткозамыкающих колец настолько велика, что медь сама по себе не может противостоять центробежным силам, и потому кольца снабжаются стальными бандажками, подлежат испытанию при повышенной скорости вращения в обязательном порядке; поэтому оно должно входить в программу их контрольного испытания.

Для многоскоростных двигателей требуется проведение испытания при повышенной скорости вращения только для наименьшего числа полюсов, т. е. для наибольшей из номинальных скоростей вращения.

Повышение скорости вращения нормально производится на 20% сверх синхронной скорости при номинальной частоте; однако двигатели, предназначенные для оборудования гидроэлектрических станций, должны испытываться повышением скорости вращения на 50%.

Исключительно жесткие требования предъявляются к крановым, подъемно-транспортным и металлургическим двигателям: согласно ГОСТ 185-53, п. 12, они должны выдерживать скорость вращения, на 10% превышающую максимальную. А так как эта последняя, согласно п. 4 этого же стандарта, в 2,5 раза превосходит синхронную скорость вращения при номинальной частоте, то испытание должно производиться при 2,75-кратной синхронной скорости.

Столь значительный запас прочности необходим для этих двигателей потому, что при спуске груза возможны весьма значительные повышения скорости вращения сверх номинальной; в целях обеспечения достаточной надежности этот же стандарт в п. 25 предписывает сплошную проверку всех выпускаемых двигателей данного вида при повышенной скорости вращения.

Повышение скорости вращения при испытании может производиться как повышением частоты питания двигателя, так и при помощи вращения испытываемого двигателя сопряженным с ним вспомогательным двигателем, имеющим соответствующую скорость вращения.

#### 4-6. Опыт холостого хода

В отличие от машин прочих видов, опыт холостого хода асинхронного двигателя может быть произведен только одним способом — в режиме двигателя при питании от источника регулируемого напряжения номинальной частоты. Условия и порядок проведения этого опыта при типовых и контрольных испытаниях и обработка его результатов установлены ГОСТ 7217-54, пп. 10—13.

Опыту холостого хода должен предшествовать прогрев подшипников при вращении без нагрузки; согласно предписаниям ГОСТ 7217-54, п. 10, при типовом испытании этот прогрев должен иметь следующую наименьшую продолжительность:

|                |                               |        |
|----------------|-------------------------------|--------|
| для двигателей | до 10 квт . . . . .           | 30 мин |
| "              | " свыше 10 до 100 квт . . . . | 60 "   |
| "              | " свыше 100 квт . . . . .     | 120 "  |

Подобно опыту холостого хода синхронной машины в режиме двигателя при  $\cos \varphi = 1$  снятие характеристики холостого хода осуществляется здесь постепенным понижением приложенного напряжения, начиная с наибольшего значения, однако не превосходящего 130% номинального, и кончая возможно более низким.

Для двигателей со значительным насыщением магнитной цепи наибольшее напряжение в опыте холостого хода может быть понижено, но не менее чем до 110% номинального.

Значения напряжений при отсчетах могут быть взяты применительно к таблице § 2-10. При очень пониженном напряжении происходит заметное возрастание скольжения, которое при более высоких значениях напряжения в отсутствии нагрузки очень незначительно; сильное увеличение тока в обмотке ротора, обусловленное возросшим скольжением, вызывает повышение тока и в обмотке статора, до тех пор уменьшавшегося по мере понижения напряжения. Это явление и ставит нижний предел напряжения в опыте холостого хода, так как дальнейшее пони-

жение напряжения уже не дает отсчетов, могущих быть использованными для построения характеристики холостого хода.

Если построить зависимость тока холостого хода  $I_0$  от приложенного напряжения  $U_0$  и провести к ней касательную из начала координат, то в нижней части этой зависимости некоторые точки могут оказаться лежащими выше касательной; их не следует учитывать при дальнейшей обработке результатов опыта (рис. 4-6).

Правильность результатов опыта холостого хода зависит от качества напряжения, приложенного к обмотке статора; в этом отношении важно соблюдение трех требований:

а) симметричность линейных напряжений;

б) чистота формы кривой напряжений;

в) устойчивость частоты.

Наибольшие затруднения представляет соблюдение первого из этих требований. Хотя современные синхронные генераторы обладают всеми данными для обеспечения симметричности напряжений, она легко нарушается по различным причинам. Стержневые трансформаторы, включенные между генератором и приемником, нарушают симметричность напряжений тем, что фаза, обмотка которой расположена на среднем стержне, находится в условиях, отличных от двух других фаз, обмотки которых расположены на крайних стержнях; в этом отношении лучшие результаты получаются от применения броневых трансформаторов, а также стержневых с сопряжением обмоток в зигзаг, несмотря на известную неэкономичность этого сопряжения.

Далее, всякая несимметричная нагрузка, подключенная параллельно с данным приемником, нарушает симметричность напряжений. Но даже в тех случаях, когда генератор с вполне симметричными напряжениями питает непосредственно один только испытываемый двигатель, симметричность напряжений на зажимах последнего зависит от того, насколько одинаковы сопротивления отдельных проводников, связывающих генератор с двигателем. В частности, при испытании малых двигателей симметричность напряжений может быть нарушена неодинаковым числом измерительных приборов (амперметров и обмоток тока ваттметров), включенных в каждый из проводников.

Чем меньше испытываемый двигатель, тем меньше измеряемый ток холостого хода; поэтому тем выше сопротивление каждого из приборов, подходящих по пределу шкалы, и тем строже надлежит соблюдать симметричность схемы. Всякое нарушение

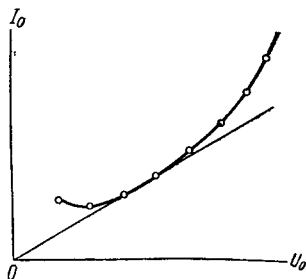


Рис. 4-6. Отклонение тока холостого хода при низких напряжениях.

симметричности напряжений приводит к неравенству линейных токов и к некоторому увеличению потерь холостого хода. Неравенство токов возрастает быстрее, чем вызывающее его неравенство напряжений, и является чувствительным признаком несимметричности; однако оно может происходить и по причинам, заключенным внутри испытываемого двигателя, как, например, неодинаковость чисел витков в фазах, неравномерность зазора между статором и ротором и т. д.

Различить причины неравенства токов нетрудно: если производить круговое переключение фаз испытываемого двигателя, то неравенство токов переходит из фазы в фазу вместе с линейными проводниками, когда оно обусловлено внешними причинами, и остается на месте, когда причина его — внутренняя. Как вывод из изложенного, при испытаниях малых двигателей, когда пределы измерения приборов приходится выбирать ниже  $5a$ , следует считать обязательным измерение токов во всех трех фазах и применение трех одинаковых ваттметров даже при контрольных испытаниях.

Наличие высших гармонических в кривой напряжения источника мало отражается на величине тока холостого хода, но ведет к заметному увеличению потерь. Борьба с высшими гармоническими, если они имеются, практически невозможна; поэтому очень важно, чтобы их содержание было как можно меньшим, на что надо обращать серьезнейшее внимание при выборе источника.

Неустойчивость частоты, если только она не выходит из пределов, допускаемых крупными энергетическими системами, мало отражается на токе и потерях холостого хода; но быстрые, хотя бы и незначительные по величине, колебания частоты сильно затрудняют отсчеты в тех случаях, когда кинетическая энергия вращающегося ротора настолько значительна, что не может достаточно быстро изменяться сообразно с изменениями частоты, вследствие чего возникают качания стрелок приборов, в особенности ваттметров.

Измерение подводимой мощности при холостом ходе происходит при очень низких значениях коэффициента мощности и поэтому не отличается точностью. Очень хорошим средством контроля правильности измерений является сравнение значений коэффициента мощности, полученных как отношение активной мощности, измеренной ваттметрами, к полной (кажущейся) мощности (сосчитанной на основании показаний вольтметров и амперметров), со значениями его, полученными по соотношению показаний ваттметров. Чем лучше совпадают оба эти значения на протяжении всех отсчетов опыта, тем более надежными можно их считать.

Результаты опыта холостого хода подвергаются следующей обработке.

1. За действительное линейное напряжение холостого хода  $U_0$  принимается среднее арифметическое из трех измеренных значений; в тех случаях, когда имеется уверенность в достаточной симметричности напряжений, можно ограничиваться одним измерением. Если частота  $f$  в момент отсчета отличается от номинальной частоты  $f_n$ , то напряжение  $U_0$  должно быть приведено к номинальной частоте по формуле

$$U'_0 = \frac{f_n}{f} U_0.$$

2. За действительный линейный ток холостого хода  $I_0$  принимается среднее арифметическое из трех измеренных значений.

3. За подводимую мощность или потери холостого хода  $P_0$  принимается измеренная мощность  $P$ , полученная как алгебраическая сумма показаний двух ваттметров и уменьшенная на величину суммы потерь во всех приборах, если последние требуется учитывать.

4. Коэффициент мощности определяется двояко: по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P}{\sqrt{3} U_0 I_0}$$

и по соотношению показаний двух ваттметров.

Будучи очень низким при повышенных значениях напряжения, он быстро возрастает при его уменьшении.

5. Потери в обмотке статора  $P_{м0}$  от тока холостого хода вычисляются:

при сопряжении фаз в звезду — по формуле

$$P_{м0} = 3 I_0^2 r_\Phi [sm],$$

при сопряжении фаз в треугольник — по формуле

$$P_{м0} = I_0^2 r_\Phi [sm],$$

где  $r_\Phi$  — сопротивление одной фазы при температуре опыта; в более ответственных случаях оно измеряется непосредственно по окончании опыта, в менее ответственных — оценивается по вероятной температуре обмотки во время опыта. Если в обмотку заложены температурные детекторы, сопротивление может быть подсчитано на основании показаний последних.

6. Сумма потерь в стали  $P_{ст}$  и механических потерь  $P_{т}$  получается вычитанием из подведенной мощности  $P_0$  потерь в обмотке статора. Отделение механических потерь производится так же, как и в опытах холостого хода для двига-



телей других видов, путем построения зависимости суммы потерь  $P_{\text{ст}} + P_r$  от квадрата напряжения и экстраполяции ее нижней прямолинейной части до пересечения с осью ординат. Отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат, представляет механические потери  $P_r$ .

Л. М. Пиотровский предложил другой способ разделения потерь холостого хода, основанный на свойствах параболы, согласно которому механические потери изображаются половиной ординаты точки касания касательной к зависимости потерь холостого хода от напряжения, проведенной из начала координат (рис. 4-7).

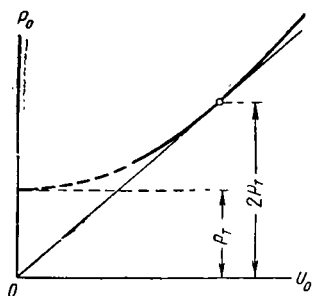


Рис. 4-7. Разделение потерь холостого хода.

Теоретические достоинства этого способа состоят в том, что он, во-первых, не требует глубокого понижения напряжения при опыте холостого хода, а, во-вторых, еще и в том, что в приложении к асинхронному двигателю он с одинаковым успехом может быть применен к зависимости от напряжения как суммы механических потерь и потерь в стали, так и полных потерь холостого хода (включая потери в обмотке статора), и даже подведенной мощности (без учета потерь в приборах, если в таком встречается необходимость).

Практическим же недостатком рассматриваемого способа является неопределенность графического нахождения точки касания, вследствие чего этот способ может применяться только в менее ответственных случаях или для быстрых подсчетов.

Если измерение произведено при частоте  $f$ , отличающейся от номинальной частоты  $f_n$ , но не более чем на  $\pm 2\%$ , то, поскольку потери в стали можно считать пропорциональными корню квадратному из куба частоты, их величина должна быть пересчитана по формуле

$$P'_{\text{ст}} = \left( \frac{f_n}{f} \right)^{\frac{3}{2}} P_{\text{ст}}.$$

Эта формула недостаточно удобна для применения; но если обозначить

$$f = f_n + \Delta f,$$

ее можно заменить приближенной формулой

$$P'_{\text{ст}} \approx \frac{f_n}{f_n + 1,5\Delta f} P_{\text{ст}},$$

которая в указанных выше пределах допустимого отклонения частоты дает ошибку, не превосходящую  $\pm 0,02\%$ , т. е. лежащую далеко ниже погрешности технических измерений мощности  $P$  приборами лучших классов точности.

Если же допустить ошибку, находящуюся в пределах  $-0,1\%$ , то можно применить еще более простую формулу

$$P'_{\text{ст}} \approx (f_{\text{н}} - 1,5\Delta f) P_{\text{ст}}.$$

Механические потери с достаточной степенью точности можно считать пропорциональными квадрату частоты; поэтому при частоте опыта, отличающейся от номинальной, они должны быть пересчитаны по формуле

$$P'_{\text{т}} = \left(\frac{f_{\text{н}}}{f}\right)^2 P_{\text{т}}.$$

Замена этой формулы более удобным для вычисления видом

$$P'_{\text{т}} \approx \frac{f_{\text{н}}}{f_{\text{н}} + 2\Delta f} P_{\text{т}}$$

дает приближенные значения, отличающиеся в указанных пределах отклонения частоты не более чем на  $\pm 0,05\%$ , а применение еще более простой формулы

$$P'_{\text{т}} \approx (f_{\text{н}} - 2\Delta f) P_{\text{т}}$$

позволяет иметь ошибку в пределах  $-0,2\%$ .

В табл. 4-1 даны поправки в процентах от измеренного значения, которые следует принимать для приведения к частоте 50 гц напряжения, потерь в стали и механических потерь при различных значениях частоты в случае отклонения ее от 50 гц не более чем на  $\pm 2\%$ .

Таблица 4-1

|                            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f$ [гц]                   | 49,0  | 49,1  | 49,2  | 49,3  | 49,4  | 49,5  | 49,6  | 49,7  | 49,8  | 49,9  |
| $\Delta U_0$ [%]           | +2,04 | +1,83 | +1,63 | +1,42 | +1,22 | +1,01 | +0,81 | +0,60 | +0,40 | +0,20 |
| $\Delta P_{\text{ст}}$ [%] | +3,08 | +2,76 | +2,45 | +2,14 | +1,83 | +1,52 | +1,21 | +0,91 | +0,60 | +0,30 |
| $\Delta P_{\text{т}}$ [%]  | +4,12 | +3,70 | +3,28 | +2,86 | +2,44 | +2,03 | +1,62 | +1,21 | +0,81 | +0,40 |
| $f$ [гц]                   | 50,1  | 50,2  | 50,3  | 50,4  | 50,5  | 50,6  | 50,7  | 50,8  | 50,9  | 51,0  |
| $\Delta U_0$ [%]           | -0,20 | -0,40 | -0,60 | -0,79 | -0,99 | -1,19 | -1,38 | -1,58 | -1,77 | -1,96 |
| $\Delta P_{\text{ст}}$ [%] | -0,30 | -0,60 | -0,89 | -1,19 | -1,48 | -1,77 | -2,07 | -2,35 | -2,64 | -2,93 |
| $\Delta P_{\text{т}}$ [%]  | -0,40 | -0,79 | -1,19 | -1,58 | -1,97 | -2,35 | -2,74 | -3,12 | -3,51 | -3,88 |

7. Иногда предъявляется требование о выделении из тока холостого хода  $I_0$  намагничивающей составляющей  $I_{\mu}$ , под которой понимается его чисто реактивная часть:

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0.$$

Значения  $\sin \varphi_0$  могут быть получены так же, как и значения  $\cos \varphi_0$ , двояким образом: либо на основании вычисления по показаниям всех применяемых приборов

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = \frac{\sqrt{3U_0^2 I_0^2 - P^2}}{\sqrt{3}U_0 I_0},$$

либо по соотношению показаний ваттметров (см. приложение VII). Кроме того,  $\sin \varphi_0$  может быть определен и из показаний третьего ваттметра симметричной схемы для измерения мощности по способу двух ваттметров, учитывающего реактивную мощность (см. рис. 1-17).

**Пример.** Опыт холостого хода асинхронного двигателя мощностью 125 *квт*, произведенный при частоте питания  $f = 49,2$  *гц*, дал следующие результаты: при приложенном напряжении  $U_0 = 360$  *в* ваттметры имели отклонения:  $\alpha_1 = -42,0$  *дел* и  $\alpha_2 = 61,4$  *дел* при цене деления  $c_{вт} = 168$  *вт/дел*. Средний измеренный ток был равен  $I_0 = 48,2$  *а*, сопротивление фазы обмотки статора, измеренное сразу после опыта,  $r_\phi = 0,0229$  *ом*. При испытании применялись: вольтметр с сопротивлением  $r_v = 8800$  *ом* и два ваттметра с сопротивлениями  $r_{вт} = 14\,000$  *ом*.

Подведенная мощность равна:

$$P = (\alpha_1 + \alpha_2) c_{вт} = (-42,0 + 61,4) 168 = 3259,2 \text{ вт.}$$

Потери в приборах

$$P_{пр} = \frac{360^2}{8800} + \frac{2 \cdot 360^2}{14\,000} = 33,2 \text{ вт,}$$

отсюда потери холостого хода

$$P_0 = P - P_{пр} = 3259,2 - 33,2 = 3226 \text{ вт.}$$

Поскольку потери в приборах участвуют в измерении мощности, коэффициент мощности следует вычислять по мощности  $P$ , а не  $P_0$ ; для сравнения со значением, определенным по отношению показаний ваттметров, он вычислен с точностью до четвертого знака:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P}{\sqrt{3} U_0 I_0} = \frac{3259,2}{1,732 \cdot 360 \cdot 48,2} = 0,1084 \approx 0,108.$$

Отношение показаний ваттметров

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = -\frac{42,0}{61,4} = -0,684.$$

По таблице приложения VI этому соответствует значение  $\cos \varphi_0 = 0,1077 \approx 0,108$ . Таким образом, при округлении до третьего знака оба значения совпадают.

Потери в обмотке статора

$$P_{м0} = 3I_0^2 r_\phi = 3 \cdot 48,2^2 \cdot 0,0229 = 159,6 \approx 160 \text{ вт.}$$

Таким образом, сумма потерь в стали и механических потерь равна:

$$P_{ст} + P_T = P_0 - P_{м0} = 3226 - 160 = 3066 \text{ вт.}$$

Разделение потерь дает величину механических потерь  $P_{\tau} = 1370$  *вт*; отсюда потери в стали

$$P_{\text{ст}} = 3066 - 1370 = 1696 \text{ вт.}$$

Поправка для приведения напряжения к частоте 50 *гц* по табл. 4-1 равна +1,63%; таким образом, исправленное напряжение

$$U'_0 = U_0 \left( 1 + \frac{\Delta U_0}{100} \right) = 360 + \frac{360 \cdot 1,63}{100} = 365,9 \text{ в.}$$

Поправка для приведения потерь в стали к частоте 50 *гц* по той же таблице равна +2,45%, откуда исправленные потери в стали

$$P'_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} \left( 1 + \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{100} \right) = 1696 + \frac{1696 \cdot 2,45}{100} = 1737,5 \text{ вт.}$$

Наконец, поправка для приведения механических потерь к частоте 50 *гц* равна +3,28%, следовательно,

$$P'_{\tau} = P_{\tau} \left( 1 + \frac{\Delta P_{\tau}}{100} \right) = 1370 + \frac{1370 \cdot 3,28}{100} = 1415 \text{ вт.}$$

Коэффициент реактивной мощности равен:

$$\sin \varphi_0 = \frac{\sqrt{3U_0^2 I_0^2 - P^2}}{\sqrt{3} U_0 I_0} = \frac{\sqrt{3 \cdot 360^2 \cdot 48,2^2 - 3259^2}}{1,732 \cdot 360 \cdot 48,2} = 0,9941.$$

По таблице приложения VII  $\sin \varphi_0 = 0,9942$ ; таким образом, и здесь при округлении до третьего знака оба значения совпадают.

Отсюда намагничивающий ток

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = 48,2 \cdot 0,994 = 47,9 \text{ а.}$$

Для графического изображения результатов опыта холостого хода следует отложить в функции от напряжения  $U_0$  (или  $U'_0$ ) следующие величины: ток холостого хода  $I_0$ , потери холостого хода  $P_0$  (или  $P'_0$ ) и коэффициент мощности  $\cos \varphi_0$ , как это представлено на рис. 4-8.

При контрольных испытаниях разрешается характеристику холостого хода не снимать, а ограничивать опыт только измерением тока и потерь холостого хода при номинальном напряжении, причем допускается не измерять частоту. При этом предполагается, что отклонения последней от номинального значения не выходят из пределов, установленных для энергетических систем.

Согласно ГОСТ 7217-54, п. 13, продолжительность обкатки для прогрева подшипников при контрольном испытании может быть сокращена:

|                |                             |           |
|----------------|-----------------------------|-----------|
| для двигателей | до 10 квт . . . . .         | до 15 мин |
| "              | " свыше 10 до 100 квт . . . | " 30 "    |
| "              | " свыше 100 квт . . . . .   | " 75 "    |

Следует, однако, отметить, что затрата времени на снятие характеристики холостого хода настолько ничтожна по сравнению с его затратой на установку, подключение и обкатку для прогрева подшипников, что при контрольных испытаниях двигателей более или менее значительных мощностей целесообразно производить все же снятие характеристики холостого хода, хотя

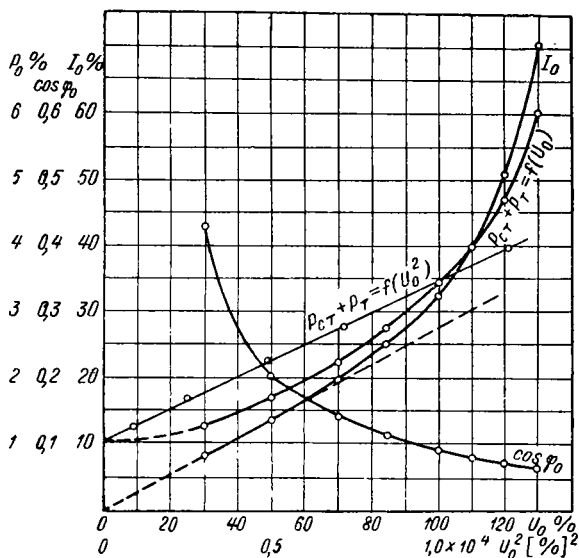


Рис. 4-8. Пример характеристики холостого хода.

бы и с уменьшенным количеством отсчетов (5—6). Тем более это целесообразно в случае отклонения потерь или тока холостого хода от ожидаемых значений, так как позволяет выяснить причину такого отклонения.

При испытании многоскоростных двигателей опыт холостого хода должен быть произведен для каждой из скоростей; рекомендуется начинать его с наибольшей скорости вращения, что позволит при переходе к меньшим скоростям не производить дополнительный прогрев подшипников.

Опыт холостого хода сопровождается проверкой обозначений выводов обмотки статора. Чередование фаз в испытательной установке должно быть известно; это дает возможность проставить обозначения выводов по системе, рассмотренной в § 3-4. Согласно ГОСТ 183-55, п. 61, порядок чередования обозначений выводов должен соответствовать порядку следования фаз при-

том направлении вращения, которое для данного двигателя является нормальным.

Если же двигатель не имеет определенного направления вращения, то порядок чередования обозначений должен соответствовать порядку следования фаз при правом вращении, т. е. по часовой стрелке, если смотреть со стороны приводного конца вала. В случае двигателя с двумя приводными концами вала правым нужно считать направление вращения по часовой стрелке со стороны того из них, от которого коробка выводов будет расположена с правой стороны, если же выводы выходят снизу или сверху, — то со стороны конца вала, противоположного выводам (или междусекционным соединениям обмотки статора).

#### 4-7. Опыт короткого замыкания

Под коротким замыканием асинхронного двигателя подразумевается питание обмотки статора при замкнутом накоротко и заторможенном роторе, которое воспроизводит начальные пусковые условия двигателя и потому позволяет определить характерные для них величины — начальный пусковой ток и начальный пусковой вращающий момент.

Трудность опыта короткого замыкания состоит в том, что при прикладывании к зажимам двигателя номинального напряжения он потребляет ток, в несколько раз превосходящий номинальный; для чего требуется источник соответствующей мощности; главное затруднение определяется тем, что вся подводимая к двигателю энергия выделяется в нем в виде тепла, быстро повышающего температуру обмоток статора и ротора.

Между тем отсчеты по приборам в цепи питания не могут быть произведены непосредственно вслед за включением: неизбежна некоторая потеря времени на успокоение колебаний стрелок приборов, которая вызывает заметное повышение температуры, а вместе с ней и сопротивлений обмоток, вследствие чего установившиеся показания приборов начинают падать буквально на глазах; подвергается опасности и сохранность изоляции обмоток.

По этим причинам ГОСТ 7217-54, п. 15, требует проведения опыта короткого замыкания при типовых испытаниях до напряжения, отличающегося от номинального не более чем на  $\pm 10\%$ , только для двигателей мощностью до 100 кВт, а для двигателей от 100 до 1000 кВт допускает проводить опыт при напряжениях меньших номинального, однако таких, чтобы наибольшее значение тока короткого замыкания было не ниже 2,5—3-кратного по отношению к номинальному.

Для двигателей мощностью выше 1000 кВт приходится еще более понижать наибольшее значение тока короткого замыка-

ния — примерно до 1,5—2-кратного по отношению к номинальному.

Во всех случаях требуется, чтобы один из отсчетов был произведен при напряжении, указанном в табл. 4-2.

Таблица 4-2

|                                             |     |     |     |     |      |      |
|---------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Номинальное напряжение, в . . .             | 127 | 220 | 380 | 500 | 3000 | 6000 |
| Напряжение короткого замыкания, в . . . . . | 33  | 58  | 100 | 130 | 800  | 1600 |

Количество отсчетов при разных значениях подводимого напряжения должно быть не меньше чем 5—7.

Продолжительность каждого отсчета не должна превосходить 10 сек; уже за такой небольшой промежуток времени температура обмотки статора способна достигнуть очень значительной величины, которую можно предварительно оценить, если известны расчетные данные двигателя.

**Пример.** Двигатель единой серии А 42/2 мощностью 4,5 кВт имеет расчетную кратность начального пускового тока, равную  $I_k : I_n = 7$ . При номинальном напряжении 380 в его номинальный ток составляет  $I_n = 9,1$  а. Обмотка статора изготовлена из проводника круглого сечения диаметром  $d = 1,35$  мм.

Таким образом, площадь поперечного сечения проводника составляет:

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,35^2}{4} = 1,431 \text{ мм}^2,$$

а плотность тока при номинальном режиме:

$$j = \frac{I_n}{q} = \frac{9,1}{1,431} = 6,36 \text{ а/мм}^2.$$

Если предположить, что нагревание обмотки статора во время опыта короткого замыкания происходит адиабатически, т. е. что все тепло, выделяющееся в обмотке, идет на повышение ее температуры (что весьма близко к действительности), то средняя скорость повышения температуры во время опыта при номинальном напряжении может быть с достаточной степенью точности определена по формуле

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{j^2}{175} \left( \frac{I_k}{I_n} \right)^2 = \frac{6,36^2}{175} \cdot 7^2 = 11,27 \text{ град/сек.}$$

Таким образом, если опыт начат при температуре обмотки 20° С, то расчетная рабочая температура 75° С будет достигнута через

$$\frac{75 - 20}{11,27} = 4,9 \text{ сек.},$$

а предельная допустимая для изоляционных материалов класса А температура 100° С — через

$$\frac{100 - 20}{11,27} = 7,1 \text{ сек.}$$

Следовательно, опыт требует хорошей организации и четкой, слаженной работы персонала.

Неплохие результаты дает следующий порядок проведения опыта: включение испытываемого двигателя производится при напряжении источника, пониженном до 15—20% от номинального, которое затем быстро поднимается до требуемого значения; это позволяет устранить качания стрелок приборов. Немедленно после снятия отсчета двигатель отключается и, если это требуется, пускается в режиме холостого хода для охлаждения. Однако такой порядок имеет смысл только тогда, когда напряжение источника может быть поднято очень быстро. Опыт следует вести, переходя от больших напряжений к меньшим.

Количество наблюдателей при опыте короткого замыкания должно быть достаточным для одновременного отсчета по команде по главнейшим включенным приборам; в наиболее ответственных случаях следует иметь по одному наблюдателю на каждый прибор, в менее важных приходится ограничиваться уменьшенным количеством наблюдателей, но не менее трех — по одному на каждый ваттметр и один для вольтметра; на каждого наблюдателя возлагается, кроме того, наблюдение за одним из амперметров, отсчеты по которым должны следовать как можно скорее за отсчетами по ваттметрам.

Крупные и средние двигатели с фазовыми роторами при токе короткого замыкания, равном номинальному, обычно не трогаются с места и потому не требуют никакого специального затормаживания; но короткозамкнутые двигатели, в особенности с улучшенными пусковыми характеристиками, даже при низких токах обладают настолько значительным вращающим моментом, что их необходимо затормаживать при помощи хомутика, надеваемого на вал, лома, просовываемого в отверстия между спицами шкива, и т. п.

Согласно требованиям ГОСТ 7217-54, п. 14, для двигателей до 100 кВт начальный вращающий момент должен измеряться непосредственно при помощи динамометра или весов; для этой цели необходимо затормаживать двигатель посредством рычага, надеваемого на конец его вала. Поскольку количество различных диаметров валов двигателей, выпускаемых данным предприятием, вряд ли может быть особенно велико, целесообразно для каждого из них иметь специальный рычаг с втулкой, пригнанной к концу вала со скользящей посадкой для возможности легкого надевания и снятия. Втулка обязательно должна быть снабжена шпоночной канавкой и надежным стопором для шпонки во избежание сползания втулки с конца вала.

Правильное значение начального вращающего момента может быть получено таким способом только в случае применения в испытываемом двигателе подшипников качения, которыми нормально снабжаются современные двигатели с мощностями.



во всяком случае, до 100 квт; но если испытываемый двигатель имеет подшипники скольжения, указанное требование ГОСТ 7217-54 не может быть к нему применено, так как эти подшипники дают значительный момент трения в покое.

Перед затормаживанием следует точно установить направление вращения двигателя, так как в случае ошибки двигатель может в момент включения сорвать затормаживающее приспособление и нанести этим тяжелые повреждения окружающему персоналу и оборудованию.

Сопротивление обмотки статора в момент отсчета учитывается при обработке результатов опыта, поэтому его следует измерять непосредственно после каждого отсчета; но если от испытания не требуется особой точности, вместо измерения сопротивления может быть допущено измерение температуры обмотки посредством температурных детекторов, заложенных при постройке двигателя или встраиваемых на время испытания. Следует помнить, однако, что при коротком замыкании, когда отсутствует вентиляция, лобовые части обмотки имеют более высокую температуру, чем пазовые, так как последние отдают тепло сердечнику. Поэтому показания температурных детекторов в пазах дают значения температуры обмотки ниже среднего.

При условии полной симметричности фаз обмотки распределение токов в фазах в меньшей степени зависит от несимметричности приложенного напряжения, чем в опыте холостого хода; тем не менее и для опыта короткого замыкания такая несимметричность крайне нежелательна. Однако опасность внесения несимметричности напряжения за счет неодинаковости сопротивлений последовательно включенных приборов здесь не столь велика, так как измеряемые токи значительно больше, а падения напряжения на приборах с подходящими пределами измерения намного ниже.

Быстрота, с которой должны производиться отсчеты при опыте короткого замыкания, не позволяет производить проверку симметричности приложенного напряжения при помощи переключения вольтметра; поэтому приходится либо ставить три вольтметра, либо ограничиваться проверкой симметричности при холостом ходе источника.

Результаты опыта подвергаются следующей обработке.

1. За действительное линейное напряжение короткого замыкания  $U_k$  принимается показание вольтметра в момент отсчета по всем приборам, а если применяются три вольтметра, — то среднее арифметическое из их показаний.

2. За действительный линейный ток короткого замыкания  $I_k$  принимается среднее арифметическое из трех измеренных значений.

3. За подводимую мощность  $P_k$  принимается алгебраическая сумма показаний двух ваттметров; поправка на по-

тери в приборах обычно не делается, так как, кроме самых малых двигателей, она лежит ниже уровня погрешности измерения.

4. Коэффициент мощности определяется, как и в опыте холостого хода, двояко: по формуле

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k I_k}$$

и по соотношению показаний ваттметров.

5. Потери в обмотке статора  $P_{м1}$  вычисляются так же, как и при холостом ходе:

в случае сопряжения фаз в звезду — по формуле

$$P_{м1} = 3 I_k^2 r_{\phi} [sm],$$

в случае сопряжения их в треугольник — по формуле

$$P_{м1} = I_k^2 r_{\phi} [sm],$$

где под  $r_{\phi}$  понимается сопротивление одной фазы статора при температуре в момент отсчета.

6. Потери в обмотке ротора  $P_{м2}$  получаются вычитанием из подведенной мощности потерь в меди статора  $P_{м1}$  и потерь в стали  $P_{ст}$ , взятых из опыта холостого хода в соответствии с напряжением  $U_k$ :

$$P_{м2} = P_k - P_{м1} - P_{ст}.$$

Фактически это не соответствует действительности, так как при одном и том же напряжении на зажимах статора поток при коротком замыкании значительно ниже потока при холостом ходе; но зато при коротком замыкании появляются потери в стали ротора, которые при холостом ходе отсутствуют. Потери в обмотке ротора пропорциональны развиваемому им вращающему моменту, что дает возможность выражать последний в единицах мощности — так называемых «синхронных» ваттах или киловаттах. Для перевода этой величины в механические единицы вращающего момента — килограммометры — следует воспользоваться формулой

$$M_k = 975 \frac{P_{м2}}{n_0} = 16,25 \frac{p P_{м2}}{f} [кг \cdot м],$$

где  $M_k$  выражено в килограммометрах, а потери  $P_{м2}$  — в киловаттах;  $n_0$  представляет синхронную скорость вращения в об/мин,  $f$  — частоту в герцах,  $p$  — число пар полюсов.

Построение результатов опыта короткого замыкания обычно производится в функции приложенного напряжения  $U_k$ ; при этом достаточно построить кривые тока  $I_k$ , потерь короткого

замыкания  $P_k$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_k$  и вращающего момента  $M_k$  или потерь в обмотке ротора  $P_{M2}$  (рис. 4-9).

Искривление зависимости тока короткого замыкания от приложенного напряжения, или характеристики короткого замыкания, происходит от насыщения путей потоков рассеяния обмоток статора и ротора, определяющего понижение

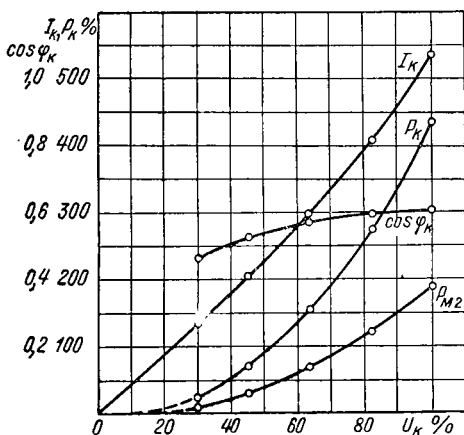


Рис. 4-9. Пример характеристики короткого замыкания.

индуктивного сопротивления машины, и тем заметнее, чем сильнее это насыщение; иногда искривление настолько ничтожно, что зависимость практически превращается в прямую, исходящую из начала координат.

Опыт короткого замыкания, произведенный при напряжении, пониженном против номинального, требует для определения тока короткого замыкания при номинальном напряжении введения поправки на насыщение (ГОСТ 7217-54, п. 16). Эта поправка состоит в том, что выше наибольшего значения при опыте ток короткого замыкания предполагается возрастающим по касательной к кривой, изображающей его зависимость от напряжения (рис. 4-10). Если эта касательная пересекает ось абсцисс в точке  $\Delta U_k$ , то для определения тока короткого замыкания  $I_{кн}$  при номинальном напряжении  $U_n$ , называемого начальным пусковым током, следует воспользоваться формулой

$$I_{кн} = \frac{U_n - \Delta U_k}{U_k - \Delta U_k} I_k,$$

где  $U_k$  и  $I_k$  — наибольшие значения напряжения и тока при опыте.

Отношение тока короткого замыкания при номинальном на-

пряжении к номинальному току носит название кратности начального пускового тока. Наибольшие допустимые значения этого отношения для двигателей с короткозамкнутым ротором установлены специализированными стандартами: для двигателей общего применения мощностью от 0,6 до 100 кВт — ГОСТ 186-52, п. 8; для двигателей мощностью от 10 до 600 вт — ГОСТ 8212-56, п. 8; для двигателей рудничных взрывобезопасных мощностью от 0,4 до 100 кВт — ГОСТ 6661-53, п. 5.

Допускаемое отклонение начального пускового тока от предписанных значений установлено в ГОСТ 183-55, п. 30, в размере  $\pm 15\%$ .

Зависимость начального пускового вращающего момента от напряжения имеет вид ветви параболы с осью, параллельной оси ординат и касающейся оси абсцисс своей вершиной. При условии постоянства температуры обмоток начальный момент можно считать пропорциональным квадрату тока короткого замыкания.

Коэффициент мощности при коротком замыкании мало зависит от напряжения, кроме начальной части характеристики короткого замыкания, в которой он быстро возрастает с увеличением напряжения вследствие отмеченного выше понижения индуктивного сопротивления машины. В дальнейшем он продолжает немного возрастать вместе с напряжением под действием продолжающегося понижения индуктивного сопротивления и повышения активных сопротивлений обмоток статора и ротора вследствие нагревания, которого трудно избежать при отсчетах с более высокими значениями тока короткого замыкания.

Отношение вращающего момента при коротком замыкании к номинальному напряжению к номинальному моменту носит название кратности начального пускового вращающего момента. Как и кратность начального пускового тока, она может быть непосредственно определена из опыта короткого замыкания лишь в том случае, когда этот последний доведен до номинального напряжения; в противном случае начальный пусковой момент определяется пересчетом: если в опыте момент  $M_k$  определен при токе  $I_k$ , то для начального пускового момента  $M_{кн}$  можно написать:

$$M_{кн} = \left( \frac{I_{кн}}{I_k} \right)^2 M_k.$$

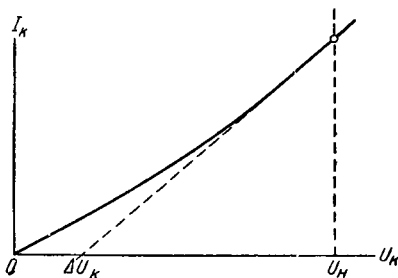


Рис. 4-10. Определение поправки на насыщение.

Кратность начального пускового вращающего момента установлена для двигателей с короткозамкнутым ротором общего применения мощностью от 0,6 до 100 кВт включительно в ГОСТ 186-52, п. 3; для двигателей мощностью от 10 до 600 вт — ГОСТ 8212-56, п. 5, а мощностью выше 100 кВт — в ГОСТ 183-55, п. 13; для двигателей крановых, подъемно-транспортных и металлургических — в ГОСТ 185-53, п. 10; для рудничных взрывобезопасных двигателей мощностью от 0,4 до 100 кВт — в ГОСТ 6661-53, п. 5.

Допускаемое отклонение начального пускового вращающего момента от предписанного значения установлено в ГОСТ 183-55, п. 30, в размере — 20 %.

При контрольных испытаниях ГОСТ 7217-54, п. 18, разрешает не снимать характеристику короткого замыкания, но лишь измерять ток и потери короткого замыкания при приложенном напряжении, указанном в табл. 4-2.

Однако, как и в отношении опыта холостого хода, следует отметить целесообразность снятия характеристики короткого замыкания при контрольных испытаниях двигателей сколько-нибудь значительных мощностей, так как затрата времени на проведение дополнительных трех-четырёх отсчетов очень невелика по сравнению с временем, затрачиваемым на установку и подключение двигателя, но зато сильно повышается достоверность опыта.

Для многоскоростных двигателей снятие характеристики короткого замыкания при типовом испытании или измерение тока и потерь короткого замыкания при контрольных испытаниях должны быть сделаны для всех скоростей вращения. При этом следует иметь в виду, что некоторые схемы двухскоростных обмоток обладают тем свойством, что при изменении числа полюсов, но при сохранении чередования фаз приложенного напряжения, направление вращения изменяется на обратное, вследствие чего затормаживающее приспособление должно быть обоюдосторонним.

**Пример.** Снята характеристика короткого замыкания восьмиполюсного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью  $P_n = 400$  кВт, с номинальным напряжением  $U_n = 3000$  в и номинальным током  $I_n = 96$  а. Опыт доведен до тока  $I_k = 250$  а, при котором напряжение короткого замыкания оказалось равным  $U_k = 1780$  в, а потери короткого замыкания  $P_k = 208$  кВт. Сопротивление одной фазы обмотки статора при  $75^\circ\text{C}$   $r_{75} = 0,5$  ом, потери в стали при номинальном напряжении  $P_{ст} = 8$  кВт.

Требуется определить кратность начального пускового тока и начального пускового вращающего момента, если касательная к характеристике короткого замыкания в ее наивысшей снятой точке пересекает ось абсцисс в точке  $\Delta U_k = 390$  в.

Ток короткого замыкания при номинальном напряжении будет равен:

$$I_{кн} = \frac{U_n - \Delta U_k}{U_k - \Delta U_k} I_k = \frac{3000 - 390}{1780 - 390} 250 = 470 \text{ а,}$$

и его кратность

$$\frac{I_{\text{кн}}}{I_{\text{н}}} = \frac{470}{96} = 4,9.$$

Потери короткого замыкания при номинальном напряжении будут равны, таким образом,

$$P_{\text{кн}} = \left( \frac{I_{\text{кн}}}{I_{\text{к}}} \right)^2 P_{\text{к}} = \left( \frac{470}{250} \right)^2 208 = 735 \text{ квт.}$$

Потери в обмотке статора при этом

$$P_{\text{м1}} = 3I_{\text{кн}}^2 r_{76} = \frac{3 \cdot 470^2 \cdot 0,5}{1000} = 331 \text{ квт.}$$

Потери в обмотке ротора, или начальный пусковой момент в синхронных киловаттах

$$M_{\text{кн}} = P_{\text{м2}} = P_{\text{кн}} - P_{\text{м1}} - P_{\text{ст}} = 735 - 331 - 8 = 396 \text{ квт,}$$

и его кратность

$$\frac{M_{\text{кн}}}{M_{\text{н}}} = \frac{396}{400} = 0,99.$$

Начальный пусковой вращающий момент в механических единицах равен:

$$M_{\text{кн}} = 16,25 \frac{P_{\text{м2}}}{f} = 16,25 \frac{4 \cdot 396}{50} = 515 \text{ кг} \cdot \text{м.}$$

Если бы была взята только одна указанная наивысшая точка, то пересчет тока короткого замыкания пропорционально напряжению дал бы всего лишь

$$I'_{\text{кн}} = \frac{3000}{1780} 250 = 421 \text{ а,}$$

т. е. 89,5% действительного значения, и потому начальный пусковой вращающий момент был бы определен сугубо преуменьшенным:

$$M'_{\text{кн}} = 0,895^2 M_{\text{кн}} = 0,895^2 \cdot 396 = 317 \text{ квт.}$$

Еще худшие результаты дали бы подобные пересчеты в том случае, если бы единственный отсчет был произведен при токе, близком к номинальному (т. е. при напряжении короткого замыкания согласно табл. 4-2).

#### 4-8. Проверка симметричности обмотки короткозамкнутого ротора

Если в короткозамкнутом роторе имеется какая-нибудь не-симметричность, например, разрыв стержней, короткозамыкающих колец и т. д., то это обнаруживается следующим опытом. К обмотке статора прикладывается трехфазное напряжение, настолько пониженное, чтобы ток короткого замыкания не вызывал

быстрого повышения ее температуры, ротор же медленно проворачивается вручную. При вполне исправной обмотке ротора такое проворачивание не влияет на показания амперметров, включенных в цепь статора; но если в ней имеется какая-либо неисправность из числа указанных выше, показания амперметров дают поочередные отклонения, тем более заметные, чем больше эта неисправность. Особенную ценность приобретает этот опыт при проверке роторов с литыми алюминиевыми обмотками, в которых при несоблюдении технологии заливки легко образуются газовые пузыри, частично или полностью нарушающие целостность отдельных стержней, что, однако, не может быть обнаружено внешним осмотром.

В двигателях с двойными короткозамкнутыми обмотками нижняя (рабочая) обмотка почти не участвует в электромагнитных процессах во время короткого замыкания; ее индуктивное сопротивление при этом настолько велико, что токи в ней ничтожны, и нарушение симметричности системы этих токов вследствие разрывов стержней крайне мало способно отразиться на симметричности токов в обмотке статора. Это обстоятельство следует иметь в виду при испытании таких двигателей; все нарушения симметричности, отмечаемые опытом, должны быть отнесены за счет верхней (пусковой) обмотки.

Иначе обстоит дело, если питать обмотку статора от источника с частотой, сильно пониженной против номинальной. Так как индуктивные сопротивления обмоток пропорциональны частоте, то при сильном понижении последней нижняя обмотка начинает принимать все большее участие в процессе короткого замыкания, что и позволяет выявить ее неисправности. Принципиально понижение частоты можно производить до тех пор, пока подвижные системы применяемых измерительных приборов не начнут реагировать на каждый отдельный полупериод измеряемой величины; в зависимости от степени успокоения приборов это соответствует частотам в 3—5 гц. Однако создание столь низких частот представляет трудную задачу, не всегда осуществимую по условиям оборудования испытательной станции. Поэтому может быть применен другой способ проверки целостности нижней обмотки — под нагрузкой, при которой обнаруживается аналогичное явление — колебание стрелок амперметров в такт с удвоенным скольжением, зачастую сопровождаемое периодическим изменением гудения; последнее особенно отчетливо проявляется в крупных быстроходных машинах. Этот способ особенно подходит для испытаний на месте установки.

В настоящее время существуют вполне удовлетворительно действующие приборы для проверки целостности роторных обмоток отдельно от статора; однако такая проверка относится к области пооперационного контроля производства электрических машин и потому здесь не рассматривается.

#### 4-9. Опыт короткого замыкания при пониженной частоте

Для построения круговых диаграмм короткозамкнутых двигателей с улучшенными пусковыми характеристиками — с двойной обмоткой ротора, с глубокими пазами или пазами фигурного профиля — требуется, как это видно из дальнейшего, выполнение опыта короткого замыкания при пониженной частоте.

Чем ниже эта последняя, тем правильное получается построение диаграммы, но тем труднее произвести опыт. Большей частью за такую частоту принимается 5 гц; при ней стрелки обычно применяемых измерительных приборов еще не реагируют на каждый отдельный полупериод измеряемой величины.

С точки зрения производимых измерений этот опыт ничем не отличается от нормального опыта короткого замыкания; а так как коэффициент мощности при нем довольно высок вследствие сильного уменьшения индуктивного сопротивления машины при пониженной частоте, точность измерений получается вполне удовлетворительной.

Главное затруднение представляет получение такой низкой частоты и поддержание ее на устойчивом уровне. Применение для этой цели нормальных двигатель-генераторов с синхронными генераторами и двигателями постоянного тока, питаемыми сильно пониженным напряжением, дает обычно неудовлетворительные результаты, так как скорость вращения получается мало устойчивой.

В этом отношении гораздо рациональнее вращение синхронного генератора двигателем постоянного тока или асинхронным двигателем через редуктор скорости или, в крайнем случае, через ременную передачу с большим передаточным числом.

Так как частотомеры на такие низкие частоты, как 5 гц, не строятся, то измерение частоты приходится заменять измерением скорости вращения генератора (или двигателя, если последний сопряжен с генератором через редуктор).

Ток короткого замыкания при опыте вполне достаточно довести до 1—1,5-кратного по отношению к номинальному; при столь умеренных значениях влияние насыщения путей потоков рассеяния еще настолько невелико, что характеристика короткого замыкания является практически прямолинейной, а фазное напряжение короткого замыкания грубо приближенно может быть принято равным удвоенному произведению тока короткого замыкания на сопротивление фазы обмотки статора:

$$U_{\text{кф}} \approx 2I_{\text{к}}r_{\text{ф}} [\text{в}].$$

#### 4-10. Испытание на нагревание в режиме непосредственной нагрузки

В асинхронном двигателе при надлежащем расчете все участки электромагнитной цепи большей частью могут быть



нагружены равномерно и в весьма высокой степени без ущерба для экономических показателей машины и ее эксплуатационных качеств, так что предельная мощность будет определяться только допустимым нагреванием, между тем как в машинах других видов зачастую предел использования той или иной части ставится отнюдь не ее нагреванием, но какими-либо иными обстоятельствами, как, например, коммутацией в машинах постоянного тока и т. п.

Превышение температуры обмотки статора определяется по окончании испытания по методу сопротивления с экстраполяцией на момент отключения, но при низком напряжении его весьма желательно контролировать по термопарам, которые закладываются заблаговременно в лобовые части с обеих сторон машины, а также в пазы под клин; термопар с одинаковыми наименованиями мест закладки должно быть по крайней мере по две для взаимной проверки. Кроме того, обязательно должны быть поставлены термопары в тело, а по возможности — и в зубцы сердечника статора, причем при значительной осевой длине его — в нескольких точках по длине; и здесь следует иметь не менее чем по две термопары с одним и тем же наименованием места закладки. Наконец, ряд термопар или термометров может быть поставлен на корпус, подшипники, струи входящего и выходящего воздуха и т. д.

Отсчеты по всем приборам, в том числе и по всем измерителям температуры, делаются через каждые полчаса, кроме самых мелких машин, для которых их следует производить чаще.

По достижении установившейся температуры производится остановка и измерение сопротивления обмотки статора с экстраполяцией на момент отключения. В двигателях с фазовыми роторами следует то же самое сделать и с обмоткой ротора. Но так как измерение сопротивления обмотки статора требует настолько большого времени, что после него уже поздно начинать измерение сопротивления обмотки ротора, то приходится поступать следующим образом: по окончании измерения сопротивления обмотки статора двигатель пускается снова и нагружается до прежней величины нагрузки; когда все отсчеты температуры, упавшей за время остановки, вновь достигнут установившихся значений, производится вторая остановка с измерением сопротивления обмотки ротора.

Помимо измерения превышения температуры обмотки ротора методом сопротивления, по окончании испытания на нагревание следует произвести также измерение температуры бандажей на лобовых частях обмотки ротора при помощи термометра или игольчатой термопары, если только конструкция двигателя это допускает.

Кроме того, в двигателях с постоянно прилегающими щетками представляет интерес температура контактных колец.

ГОСТ 7217-54, п. 27, допускает измерение превышения температуры обмоток статора и фазового ротора методом сопротивления через каждые полчаса в процессе испытания, если имеется возможность проводить эти измерения без остановки двигателя или путем кратковременной остановки не более чем на 15—20 сек для двигателей мощностью до 50 квт.

Характерной особенностью асинхронных двигателей является то, что вследствие допустимых отклонений коэффициента полезного действия и коэффициента мощности от гарантированных значений потребляемый ток при номинальной отдаваемой мощности может отличаться от расчетного значения номинального тока на довольно заметную величину. Испытание на нагревание производится нормально при номинальном потребляемом токе, поскольку к моменту проведения испытания на нагревание значение тока, соответствующего номинальной отдаваемой мощности, еще неизвестно.

Тогда превышение температуры обмотки статора  $\Delta\vartheta'$ , соответствующее потребляемому току  $I$  при номинальной отдаваемой мощности, может быть получено путем пересчета превышения температуры  $\Delta\vartheta$ , соответствующего номинальному току  $I_n$ , по формуле

$$\Delta\vartheta' = \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 \Delta\vartheta.$$

По смыслу определения понятия о допускаемых отклонениях такой пересчет может быть сделан только при условии, что  $I > I_n$ . В противном случае превышение температуры обмотки статора должно быть принято равным полученному из опыта при номинальном значении тока, или же должен быть поставлен вопрос о пересмотре последнего в сторону его уменьшения за счет понижения номинальной мощности и т. д.

Асинхронные двигатели представляют вид электрических машин, в котором особенно часто применяется интенсивная вентиляция. Поэтому всякое нарушение правильности последней неизбежно ведет к увеличению превышений температуры всех его частей.

Испытание на нагревание не должно производиться в стесненной обстановке, чтобы не мог иметь место застой нагретого воздуха, выбрасываемого как самим двигателем, так и вспомогательной машиной.

В двигателях с короткозамкнутыми роторами особенно часто наблюдается ненормальный вид изменения сопротивления обмотки статора после отключения, когда в начале оно не падает, а, наоборот, повышается. Это происходит потому, что для изолированных короткозамкнутых обмоток роторов допускаются гораздо более высокие превышения температуры, чем для изолированных обмоток; при малой величине зазора асинхронного

двигателя передача тепла от ротора к статору происходит очень интенсивно.

Испытание асинхронных двигателей на нагревание косвенными методами осуществляется сложнее, чем для машин других видов, и представляет гораздо больше затруднений при обработке полученных результатов; поэтому, несмотря на немалое количество методов, предложенных различными авторами, оно не нашло широкого применения в промышленных испытаниях. Ввиду явной недостаточности накопленного материала по этому вопросу испытание на нагревание косвенными методами ГОСТ 7217-54 не предусматривает.

Испытание на нагревание многоскоростных двигателей следует производить для каждой из номинальных скоростей вращения.

#### 4-11. Снятие рабочих характеристик

Под рабочей характеристикой асинхронного двигателя ГОСТ 7217-54, п. 30, понимает зависимость от полезной мощности ряда величин, характерных для эксплуатации: потребляемой мощности, тока, скольжения, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности, при условии неизменности приложенного напряжения и его частоты. Главной целью снятия характеристики является проверка гарантированных значений последних трех из перечисленных величин.

Снятие рабочей характеристики производится посредством поочередного осуществления различных нагрузок в пределах от перегрузки не менее чем на 10% сверх номинальной мощности и до холостого хода.

По возможности следует начинать опыт с перегрузки по току на 50%, являющейся одним из пунктов программы типового испытания. Согласно ГОСТ 183-55, п. 15, и ГОСТ 8212-56, п. 13, двигатели мощностью до 0,6 кВт должны выдерживать эту перегрузку 1 мин, а мощностью выше 0,6 кВт — 2 мин, — т. е. время, вполне достаточное для производства всех необходимых измерений, в частности для измерения скольжения. Так как такая перегрузка по току не всегда может быть осуществлена при номинальном напряжении, допускается на это время понизить подведенное напряжение; однако при чрезмерно сильном его понижении двигатель может «опрокинуться», т. е. затормозиться.

Снятие рабочей характеристики следует производить сразу после испытания на нагревание; если же этого сделать нельзя, то перед началом снятия характеристики нужно основательно прогреть двигатель при нагрузке около номинальной с тем, чтобы температура обмоток статора и ротора установилась. Из соображений поддержания температуры целесообразно вести испытание, переходя от более высоких нагрузок к более низким, а не наоборот, что и отмечено в ГОСТ 7217-54, п. 30.

Большинство применяемых методов измерения скольжения требуют известного времени на производство отсчетов; понятно, что в течение этого времени режим двигателя должен оставаться совершенно неизменным.

В соответствии с ГОСТ 183-55, пп. 42—44 и 47, и ГОСТ 7217-54, пп. 31 и 32, результаты измерений подвергаются следующей обработке:

1. За действительное приложенное линейное напряжение  $U$  принимается среднее арифметическое из трех измеренных значений.

2. За действительный потребляемый линейный ток  $I$  принимается среднее арифметическое из трех измеренных значений.

3. За подводимую (потребляемую) мощность  $P_1$  принимается измеренная мощность  $P$ , полученная как алгебраическая сумма показаний двух ваттметров и уменьшенная на величину суммы потерь во всех приборах (если в учете последних есть необходимость).

4. Коэффициент мощности определяется двояко: по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}$$

и по соотношению показаний двух ваттметров.

5. Потери в обмотке статора  $P_{м1}$  определяются, как и в опытах холостого хода и короткого замыкания, в зависимости от сопряжения фаз обмотки статора, по формулам:

$$P_{м1} = 3I^2 r_{75} [вт] \text{ или } P_{м1} = I^2 r_{75} [вт].$$

Но, в отличие от этих опытов, сопротивление одной фазы обмотки  $r_{75}$  берется для расчетной рабочей температуры  $75^\circ \text{C}$ , а не для температуры обмотки во время опыта.

6. Потери в стали  $P_{ст}$  предполагаются не зависящими от нагрузки и определяются из опыта холостого хода в соответствии с приложенным напряжением.

7. Электромагнитная мощность  $P_{эм}$ , т. е. мощность, переданная вращающимся полем со статора на ротор, определяется как разность между подводимой мощностью и потерями в статоре:

$$P_{эм} = P_1 - P_{м1} - P_{ст}.$$

8. Потери в обмотке ротора  $P_{м2}$  определяются как произведение скольжения, выраженного в долях единицы, на электромагнитную мощность:

$$P_{м2} = \frac{P_{эм}s}{100}.$$

9. Механические потери  $P_T$  предполагаются постоянными и берутся из опыта холостого хода.

10. Добавочные потери  $P_d$  в асинхронных машинах определяются условно; согласно ГОСТ 183-55, п. 47, их величина при всех нагрузках принимается в 0,5% от подводимой мощности:

$$P_d = 0,005 P_1.$$

Считается, что они покрываются механическим путем за счет электромагнитной мощности.

11. Полезная (отдаваемая) мощность  $P_2$  определяется как разность между подводимой мощностью и суммой всех указанных потерь:

$$P_2 = P_1 - \sum P = P_1 - (P_{м1} + P_{ст} + P_{м2} + P_T + P_d).$$

12. Коэффициент полезного действия  $\eta$  подсчитывается на общих основаниях как умноженная на 100 разность между единицей и величиной отношения суммы потерь к подводимой мощности:

$$\eta = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_1} \right) [\%].$$

Потребляемый ток, скольжение, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности и подводимая мощность откладываются на графике в зависимости от полезной мощности.

Пример такого построения дан на рис. 4-11.

**Пример.** При снятии рабочей характеристики асинхронного двигателя с номинальным напряжением  $U = 380$  в один из отсчетов дал следующие результаты: средний потребляемый ток  $I = 24,8$  а; подводимая мощность  $P_1 = 14\,303$  вт; скольжение  $s = 4,08\%$ . Сопротивление одной фазы обмотки статора при  $75^\circ\text{C}$   $r_{75} = 0,372$  ом; потери в стали по опыту холостого хода  $P_{ст} = 258$  вт; механические потери  $P_T = 151$  вт.

Потери в обмотке статора

$$P_{м1} = 3I^2 r_{75} = 3 \cdot 24,8^2 \cdot 0,372 = 686 \text{ вт.}$$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = P_1 - P_{м1} - P_{ст} = 14\,303 - 686 - 258 = 13\,359 \text{ вт.}$$

Потери в обмотке ротора

$$P_{м2} = \frac{P_{эм}s}{100} = \frac{13\,359 \cdot 4,08}{100} = 545 \text{ вт.}$$

Добавочные потери

$$P_d = 0,005 P_1 = 0,005 \cdot 14\,303 \approx 72 \text{ вт.}$$

Полиые потери

$$\begin{aligned}\sum P &= P_{M1} + P_{CT} + P_{M2} + P_T + P_d = \\ &= 686 + 258 + 545 + 151 + 72 = 1712 \text{ вт.}\end{aligned}$$

Отдаваемая мощность

$$P_2 = P_1 - \sum P = 14\,303 - 1712 = 12\,591 \text{ вт.}$$

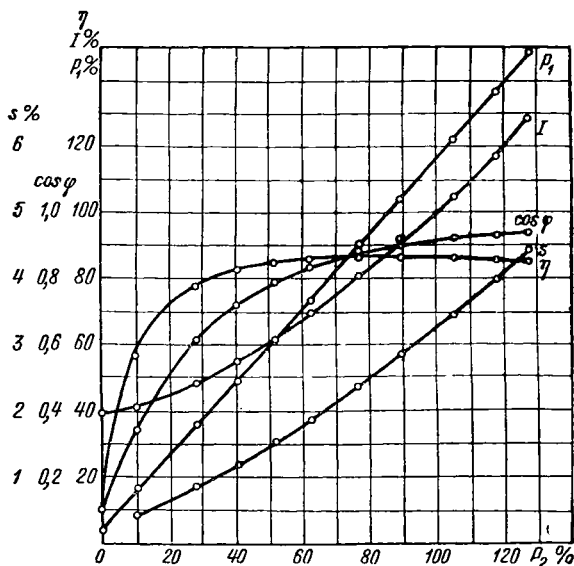


Рис. 4-11. Пример рабочей характеристики.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_1} \right) = 100 \left( 1 - \frac{1712}{14\,303} \right) = 88,03\%.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} UI} = \frac{14\,303}{1,732 \cdot 380 \cdot 24,8} = 0,875$$

Из всех измеряемых величин наименьшей точностью отличается здесь скольжение, главным образом потому, что его измерение требует некоторого промежутка времени. Поэтому рекомендуется производить проверку правильности определения скольжения путем построения зависимости его измеренных зна-

чений от потребляемого тока, которая в большинстве случаев в довольно широких пределах имеет вид прямой (рис. 4-12); значения, сильно отклоняющиеся от этой зависимости, могут быть исправлены на основании такого построения.

Нередко, когда ставится вопрос о проверке правильности выбора расчетных данных машины, приходится производить снятие рабочих характеристик не только при номинальном напряжении, но и при иных, более или менее отличающихся от номинального

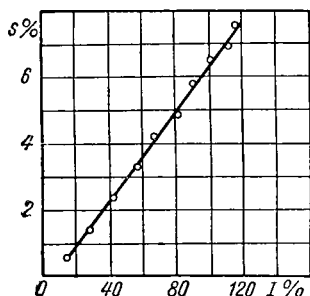


Рис. 4-12. Зависимость скольжения от потребляемого тока.

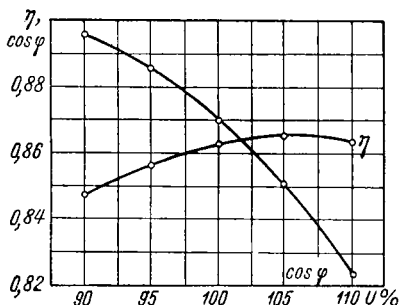


Рис. 4-13. Кривые напряжения.

как в большую, так и в меньшую сторону. Значения основных величин, соответствующие номинальной мощности, выбираются из этих характеристик и откладываются в зависимости от напряжения (рис. 4-13).

Такие зависимости (в первую очередь коэффициента полезного действия и коэффициента мощности) носят общее название кривых напряжения.

Проверка гарантированных значений коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и скольжения должна производиться посредством графического определения этих значений из характеристики.

Если снятие рабочей характеристики доведено до максимального (опрокидывающего) момента, то определение последнего, согласно ГОСТ 7217-54, п. 38, может производиться либо по снятой рабочей характеристике, либо непосредственным измерением, для чего необходима нагрузка двигателя балансирным генератором постоянного тока или электромагнитным тормозом.

Ввиду того, что снятие рабочих характеристик крупных двигателей требует наличия оборудования значительной мощности, оно не всегда может быть осуществлено. Поэтому проверка гарантированных значений коэффициента полезного действия, коэффициента мощности и скольжения по снятой рабочей харак-

теристике обязательна для двигателей мощностью только до 100 *квт*. Для более крупных двигателей допускается проверка этих значений по круговым диаграммам (ГОСТ 7217-54, п. 30).

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности при номинальной нагрузке и максимальный вращающий момент являются нормированными величинами; их значения для различных мощностей, скоростей вращения и напряжений предписываются большинством специализированных стандартов на асинхронные двигатели (ГОСТ 186-52, пп. 7 и 9; ГОСТ 6661-53, п. 5; ГОСТ 8212-56, пп. 7 и 9; а в отношении только максимального момента — ГОСТ 183-55, п. 14; ГОСТ 185-53, п.10).

Основным стандартом ГОСТ 183-55, п. 30, для этих показателей установлены предельные допускаемые отклонения.

Допускаемое отклонение для к. п. д.  $\Delta\eta$  определяется с округлением до третьего знака для двигателей мощностью до 50 *квт* включительно по формуле

$$\Delta\eta = -0,15(1 - \eta),$$

но не менее 0,007 (по абсолютной величине), где  $\eta$  — предписанное значение к. п. д., а для двигателей мощностью свыше 50 *квт* — по формуле

$$\Delta\eta = -0,1(1 - \eta)$$

при  $\eta \leq 0,95$  и

$$\Delta\eta = -0,005$$

при  $\eta > 0,95$ .

Допускаемое отклонение для коэффициента мощности  $\Delta \cos \varphi$  при всех мощностях определяется по формуле

$$\Delta \cos \varphi = -\frac{1 - \cos \varphi}{6},$$

но не менее —0,02 и не более —0,07, где  $\cos \varphi$  — предписанное значение коэффициента мощности.

При этом допускается значение измеренного коэффициента мощности меньше на 0,02 против нижнего предела установленного значения с учетом допускаемых отклонений, при условии, что произведение полученных измерениями значений коэффициента мощности и коэффициента полезного действия машины не ниже произведения установленных значений этих величин с учетом допускаемых отклонений.

Допускаемое отклонение для максимального вращающего момента установлено в размере —10%. Хотя скольжение при номинальной нагрузке не нормировано ни в одном из действующих стандартов, на него также установлено допускаемое отклонение в размере +25%.



**Пример.** При испытании четырехполюсного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 55 кВт в защищенном исполнении получены следующие значения экономических показателей при номинальной нагрузке: коэффициент полезного действия  $\eta_n = 90,8\%$ , или 0,908; коэффициент мощности  $\cos \varphi_n = 0,865$ .

Требуется определить, удовлетворяет ли данный двигатель требованиям стандарта по экономическим показателям.

Согласно ГОСТ 186-52, п. 9, табл. 5, предписанное значение коэффициента полезного действия  $\eta = 91,0\%$  или 0,910 и коэффициента мощности  $\cos \varphi = 0,890$ .

Допускаемое отклонение для к. п. д.

$$\Delta\eta = -0,1(1 - \eta) = -0,10(1 - 0,910) = -0,009$$

и для коэффициента мощности

$$\Delta \cos \varphi = -\frac{1 - \cos \varphi}{6} = -\frac{1 - 0,890}{6} = -0,018.$$

Так как сосчитанное таким образом допускаемое отклонение по абсолютной величине меньше 0,02, следует принять его значение  $\Delta \cos \varphi = -0,02$ .

Таким образом, допускаемое значение к. п. д.

$$\eta + \Delta\eta = 0,910 - 0,009 = 0,901$$

и допускаемое значение коэффициента мощности

$$\cos \varphi + \Delta \cos \varphi = 0,890 - 0,020 = 0,870.$$

Измеренное значение к. п. д. лежит в пределах между предписанным значением и значением с учетом допускаемого отклонения, т. е. удовлетворяет требованиям стандарта; но измеренное значение коэффициента мощности лежит ниже предписанного значения с учетом допускаемого отклонения.

Однако произведение измеренных значений

$$\eta_n \cos \varphi_n = 0,908 \cdot 0,865 = 0,785$$

превосходит произведение значений с учетом допускаемых отклонений

$$(\eta + \Delta\eta)(\cos \varphi + \Delta \cos \varphi) = 0,901 \cdot 0,870 = 0,784,$$

и потому двигатель может быть признан удовлетворяющим требованиям стандарта, хотя и на самом их пределе.

#### 4-12. Построение круговых диаграмм

Круговая диаграмма асинхронного двигателя рассматривает его как трансформатор, все параметры которого постоянны и не зависят от режима, кроме одного только активного сопротивления вторичной цепи (т. е. в данном случае цепи ротора), изменением которого и определяется режим при неизменном напряжении, приложенном к первичной цепи.

При таком допущении геометрическим местом концов векторов тока, потребляемого двигателем при различных режимах, является окружность.

Однако в действительности ни один из параметров асинхронного двигателя не является постоянным. При рассмотрении

опыта короткого замыкания было отмечено, что вследствие насыщения путей потоков рассеяния обмоток статора и ротора изменяются их индуктивные сопротивления, в силу чего характеристика короткого замыкания отклоняется от прямолинейной. Не остаются неизменными и активные сопротивления; так, активное сопротивление обмотки ротора возрастает при увеличении скольжения вследствие явления вытеснения тока. Кроме того, активные сопротивления обеих обмоток — и статора, и ротора — зависят от их температуры, причем эта зависимость, в отличие от предыдущих, не находится в прямой связи с режимом машины. Поэтому действительная диаграмма работы асинхронного двигателя на протяжении от холостого хода до короткого замыкания отличается от окружности тем в большей степени, чем больше изменение его параметров в этом промежутке. Особенно значительно это отличие в тех двигателях, в которых с целью улучшения пусковых характеристик — увеличения начального пускового вращающего момента и уменьшения начального пускового тока — используется явление вытеснения тока в проводниках обмотки ротора, какими являются двигатели с двойной клеткой, с глубоким пазом и т. д.

Таким образом, по существу каждая точка действительной диаграммы должна принадлежать своему особому кругу, построенному для тех значений параметров, которые соответствуют этой точке: индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора определяются насыщением путей потоков рассеяния, которое зависит от величины токов в этих обмотках, а активное сопротивление обмотки ротора — вытеснением тока, зависящим от частоты тока  $f'$  в этой обмотке, следовательно от скольжения ротора  $s$ :

$$f' = \frac{sf}{100} [z\eta],$$

где  $f$  — номинальная частота.

Конечно, такая постановка вопроса не может считаться приемлемой при промышленных испытаниях. Однако они и не предъявляют к диаграмме требования представлять весь режим работы двигателя от холостого хода до короткого замыкания: для них вполне достаточно, если диаграмма дает возможность проверки гарантированных значений к. п. д., коэффициента мощности и скольжения при номинальном режиме, а также гарантированного значения максимального (опрокидывающего) вращающего момента при номинальном напряжении.

Следовательно, требуется построение двух кругов тока для указанных режимов, и задача испытания сводится к тому, чтобы обеспечить эти построения необходимыми исходными данными.

Такая задача является вполне разрешимой при предположении, что, с одной стороны, насыщение путей потоков рассеяния

не зависит ни от основного (рабочего) потока машины, ни от частоты, а с другой стороны,— что вытеснение тока в свою очередь является независимым от насыщения.

Это предположение и положено в основу предписаний ГОСТ 7217-54 в отношении построения круговых диаграмм. Оно даст вполне удовлетворительные результаты в подавляющем большинстве случаев; и только когда рассеяние обмотки ротора связано зависимостью с вытеснением тока, построение диаграммы встречает трудно преодолимые препятствия. Это имеет место, например, при наложении бандажей из магнитных сталеи на медные короткозамыкающие кольца обмотки ротора (в двухполюсных двигателях крупных мощностей, когда диаметр колец настолько велик, что центробежные силы в них превосходят предел текучести меди), а также в случае массивных роторов.

ГОСТ 7217-54 различает три случая построения диаграммы:

а) двигатели с фазовыми роторами;

б) двигатели с короткозамкнутыми роторами, имеющими так называемую «простую» клетку, под которой понимается клетка из одинаковых стержней, высота которых не превышает 10 мм для медных и 16 мм для алюминиевых стержней;

в) двигатели с короткозамкнутыми роторами с двойной клеткой или с глубокими пазами.

К последним могут быть отнесены и двигатели с пазами бутылочного или трапециевидного профиля, если они не имеют магнитных бандажей на короткозамыкающих кольцах. Для первых двух категорий двигателей вполне достаточные исходные данные для построения диаграммы дают опыты холостого хода и короткого замыкания при номинальной частоте, доведенного до 2,5—3-кратного номинального тока.

Чтобы построить круг, к которому принадлежит точка номинального режима, нужно найти такой условный ток короткого замыкания, который имел бы место при номинальном напряжении, если бы все параметры сохраняли значения, соответствующие номинальному режиму.

При сделанных выше допущениях параметры при коротком замыкании с номинальным значением тока должны быть такими же, как и при номинальном режиме. Поэтому искомый условный ток короткого замыкания  $I_k$  может быть определен по характеристике короткого замыкания пропорциональным пересчетом с напряжения  $U_{кн}$ , соответствующего номинальному значению тока короткого замыкания  $I_n$ , на номинальное напряжение  $U_n$  (рис. 4-14):

$$I_k = I_n \frac{U_n}{U_{кн}}.$$

Если нижняя часть характеристики короткого замыкания прямолинейна, это дает основание считать, что круг, построен-

ный для номинального режима, пригоден также и для других нагрузок — как ниже номинальной, так и выше нее; таким образом по данным диаграммы может быть построена рабочая характеристика. Однако этот круг непригоден для определения максимального вращающего момента, при котором значение потребляемого тока в 2,5—3 раза больше номинального.

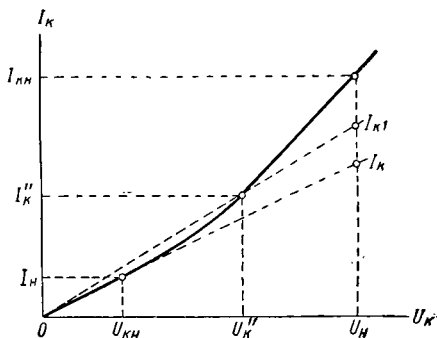


Рис. 4-14. Определение условных токов короткого замыкания.

Рассуждая по-предыдущему, круг тока для этой цели должен быть построен по условному току короткого замыкания, который мог бы быть при номинальном напряжении, если бы параметры машины сохранили значения, соответствующие указанному значению потребляемого тока.

Такой условный ток короткого замыкания  $I_{k1}$  получается пропорциональным пересчетом с напряжения  $U_k''$ , соответствующего 2,5—3-кратному значению тока короткого замыкания  $I_k''$ , на номинальное напряжение  $U_H$ , как это показано на том же рис. 4-14:

$$I_{k1} = I_k'' \frac{U_H}{U_k''}.$$

Разумеется, что в обоих случаях измеренные потери короткого замыкания должны быть пересчитаны пропорционально квадратам токов.

Для третьего случая построения диаграммы из числа предусмотренных ГОСТ 7217-54, т. е. для двигателей, в которых с целью улучшения пусковых характеристик используется явление вытеснения тока в обмотке ротора, описанный прием не может дать правильных результатов потому, что при снятии харак-

теристики короткого замыкания параметры машины из-за вытеснения тока резко отличаются от соответствующих как номинальному режиму, так и точке максимального вращающего момента.

Зависимость вытеснения тока от частоты чрезвычайно сложна; однако для двигателей с номинальной частотой 50 гц можно с уверенностью утверждать, что при частоте питания 5 гц увеличение активного сопротивления обмотки ротора любой конструкции по сравнению с соответствующим измерению постоянным током еще ничтожно мало. Поэтому по идее Б. И. Кузнецова круг тока для номинального режима может быть построен по условному току короткого замыкания, полученному на основании характеристики короткого замыкания при пониженной частоте, обычно при 5 гц.

Разумеется, что этот ток должен быть пересчитан с напряжения при опыте на номинальное напряжение, а потери короткого замыкания — пропорционально квадрату тока; но этого еще мало: масштаб мощности при пониженной частоте равен масштабу мощности при номинальной частоте, умноженному на отношение пониженной частоты к номинальной, что должно учитываться при всех построениях, связанных с пониженной частотой.

Еще более осложняется построение круга тока для определения максимального вращающего момента.

В предположении, что явление вытеснения тока и насыщение путей потоков рассеяния обмоток независимы друг от друга, это построение может быть сделано в два этапа, один из которых учитывает только насыщение при неизменном вытеснении, а другой — только вытеснение при неизменном насыщении. В действительности это не вполне верно, так как вытеснение тока уже определяет собой также и изменение индуктивного сопротивления обмотки ротора.

В качестве первого этапа, учитывающего насыщение, может быть предложено построение двух кругов, для одного из которых используется условный ток короткого замыкания, полученный из характеристики короткого замыкания при номинальной частоте пересчетом с напряжения, соответствующего номинальному значению тока, на номинальное напряжение. Для второго же круга используется условный ток короткого замыкания, полученный подобным же пересчетом со значения, равного 2,5—3-кратному номинальному. Таким образом, получение обоих условных токов вполне аналогично тому, которое было указано для построения двух кругов диаграммы двигателя с фазовым ротором или с короткозамкнутым ротором, имеющим простую клетку.

Эти два круга построены при индуктивных сопротивлениях, соответствующих номинальному режиму и режиму макси-

мального вращающего момента, но при активном сопротивлении ротора, соответствующем номинальной частоте, а не пониженной частоте, в пределах которой заключены оба указанных режима.

Вторым этапом построения и является учет разницы в частотах. При сделанном предположении о независимости влияний насыщения и вытеснения тока диаметр круга для номинального режима должен находиться в таком же соотношении с диаметром круга для максимального момента, как и диаметры двух кругов, построенных в первом этапе.

Две точки — точка холостого хода и точка короткого замыкания — еще не определяют положение круга тока; нужно либо добавить еще одну точку, что не представляется возможным в общем случае, либо определить положение центра круга.

При построении диаграмм, предписываемых нормами ГОСТ 7217-54, применяется способ определения положения центра круга тока, предложенный М. П. Костенко. Согласно этому способу диаметр круга тока представляется повернутым против часовой стрелки относительно конца вектора тока холостого хода  $I_0$  так, что составляет с осью мнимых количеств некоторый угол  $\alpha$ , при неизменном приложенном напряжении зависящий только от тока холостого хода  $I_0$  и от активного сопротивления обмотки статора  $r_1$ .

Поскольку точка холостого хода является общей для всех кругов, входящих в состав диаграммы, центры этих кругов лежат на одной и той же прямой.

Следует отметить, что для крупных асинхронных двигателей ввиду малости тока холостого хода  $I_0$  и активного сопротивления обмотки статора  $r_1$  величина угла  $\alpha$  незначительна.

Таким образом, именно для тех двигателей, для которых ГОСТ 7217-54 допускает проверку гарантированных значений посредством круговой диаграммы, т. е. для двигателей мощностью свыше 100 кВт, влияние угла  $\alpha$  на точность построения очень мало.

#### 4-13. Построение круговой диаграммы двигателя с фазовым ротором

Для построения круговой диаграммы двигателя с фазовым ротором необходимы следующие данные:

- 1) фазовый ток холостого хода  $I_0$  при номинальном напряжении и номинальной частоте;
- 2) разность между потерями холостого хода и механическими потерями  $P_0 - P_r$ .
- 3) линейное напряжение  $U_{\text{кн}}$ , соответствующее номинальному значению  $I_n$  фазового тока короткого замыкания;

4) потери короткого замыкания  $P_{\text{кн}}$ , соответствующие номинальному значению тока короткого замыкания;

5) фазовый ток короткого замыкания  $I'_\text{к}$ , равный 2,5—3-кратному номинальному фазовому току;

6) линейное напряжение короткого замыкания  $U'_\text{к}$ , соответствующее току  $I'_\text{к}$ ;

7) потери короткого замыкания  $P'_\text{к}$ , соответствующие току  $I'_\text{к}$ ;

8) коэффициент трансформации  $K_\tau$ ;

9) сопротивление одной фазы обмотки статора  $r_1$ , приведенное к  $75^\circ\text{C}$ ;

10) сопротивление одной фазы обмотки ротора  $r_2$ , приведенное к  $75^\circ\text{C}$ .

Предварительно надлежит произвести следующую переработку этих данных:

а) вычислить условный фазовый ток короткого замыкания  $I_\text{к}$  при номинальном напряжении, пользуясь формулой

$$I_\text{к} = I_\text{н} \frac{U_\text{н}}{U_{\text{кн}}};$$

б) вычислить условные потери  $P_\text{к}$  по формуле

$$P_\text{к} = P_{\text{кн}} \left( \frac{I_\text{к}}{I_\text{н}} \right)^2;$$

в) вычислить условный фазовый ток короткого замыкания  $I_{\text{к1}}$  при номинальном напряжении по формуле

$$I_{\text{к1}} = I'_\text{к} \frac{U_\text{н}}{U'_\text{к}};$$

г) вычислить условные потери  $P_{\text{к1}}$  по формуле

$$P_{\text{к1}} = P'_\text{к} \left( \frac{I_{\text{к1}}}{I'_\text{к}} \right)^2;$$

д) привести сопротивление фазы ротора к числу витков обмотки статора по формуле

$$r'_2 = r_2 K_\tau^2.$$

Перед началом построения надлежит выбрать масштаб тока:

$$1 \text{ мм} = A [a],$$

который должен быть удобен для работы, для чего желательно, чтобы он был равен или кратен одному из чисел ряда:

$$1; 2; (2,5); 5; 10 \dots \text{и т. д.}$$





тока. Точка  $K$  представляет конец вектора условного тока короткого замыкания  $I_k$ .

Точки  $O$  и  $K$  соединяются прямой и из ее середины (точка  $E$ ) восстанавливается перпендикуляр, пересечение которого с линией  $OD$  определит центр круга тока  $C$ .

Следующей операцией является проведение линий вращающего момента и полезной мощности,

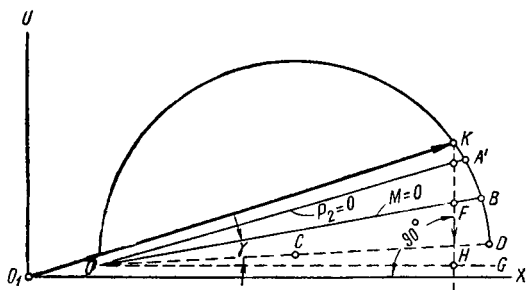


Рис. 4-16. Построение линий момента и полезной мощности двигателя с фазовым ротором.

Линией вращающего момента  $M=0$  является прямая  $OB$  (рис. 4-16), исходящая из точки  $O$  под углом  $\gamma$  к диаметру круга тока  $OD$ , причем

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{D_a r_1}{U_{\text{нф}}},$$

где  $D_a$  — диаметр круга тока в амперах.

Точка  $B$  на круге тока является теоретической точкой бесконечно большого скольжения  $s = \infty$ .

Если из точки  $K$ , т. е. из конца вектора условного тока короткого замыкания  $I_k$ , опустить перпендикуляр  $KH$  на прямую  $OG$  и от точки  $F$  его пересечения с линией вращающего момента  $OB$  отложить вверх отрезок, изображающий потери в обмотке ротора при коротком замыкании

$$\overline{FA'} = \overline{FH} \frac{r_2'}{r_1},$$

то прямая, проходящая через точки  $O$  и  $A'$ , будет являться линией полезной мощности  $P_2 = 0$ , а точка  $A$  ее пересечения с кругом тока — точкой теоретического короткого замыкания, или точкой скольжения  $s = 1$ .



можно будет определить и добавочные потери так, как это делается при подсчете к. п. д. по отдельным потерям.

Засечка величиной номинального момента параллельно линии  $OB$  на круг тока определит положение конца вектора потребляемого тока — точку  $L$ . Тогда пересечение прямой  $LB$  со шкалой скольжения даст на последней его искомое значение в процентах. Если это значение заметным образом отличается

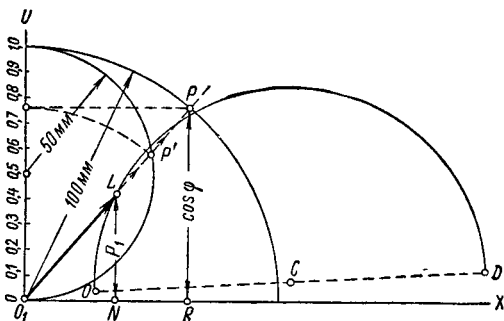


Рис. 4-18. Построение кругов для определения  $\cos \varphi$ .

от соответствующего предварительно принятой номинальной скорости вращения  $n_n$ , может потребоваться перестраивание точки  $L$  по соответствующему исправленному значению номинального момента. Впрочем, для двигателей мощностью выше 100 кВт возможная ошибка в величине скольжения при предварительном выборе номинальной скорости вращения настолько невелика, что вряд ли превосходит точность графического построения.

Построение диаграммы в части номинального режима завершается нанесением окружности для определения коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , которое может быть сделано двумя способами (рис. 4-18).

Один из них, рекомендуемый ГОСТ 7217-54, состоит в том, что из точки  $O_1$  радиусом 100 мм описывается дуга окружности между осями  $O_1U$  и  $O_1X$ . Если из точки  $P$  пересечения этой окружности вектором тока или его продолжением опустить перпендикуляр на ось  $O_1X$ , то его длина в миллиметрах будет представлять коэффициент мощности в сотых долях единицы:

$$\cos \varphi = \frac{\overline{PR} \text{ [мм]}}{100}.$$

По второму способу на оси  $O_1U$  радиусом 50 мм строится полуокружность, касательная к оси  $O_1X$ . Тогда коэффициент мощности в сотых долях единицы будет равен длине хорды  $O_1P'$

в миллиметрах, отсекаемой на этой окружности вектором тока или его продолжением:

$$\cos \varphi = \frac{\overline{O_1 P'} [\text{м.м.}]}{100}.$$

Радиусы окружностей в обоих способах могут быть и иными, но это должно быть учтено при измерении отрезков  $\overline{PR}$  или  $\overline{O_1 P'}$ .

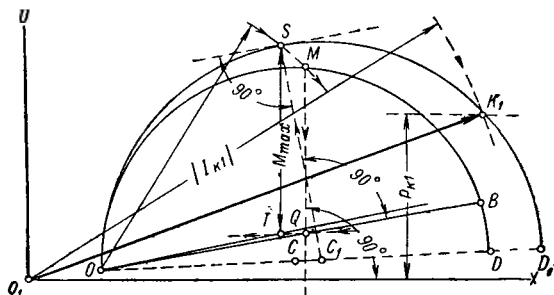


Рис. 4-19. Построение круга для определения максимального момента двигателя с фазовым ротором.

Подводимую мощность  $P_1$  и отдаваемую мощность  $P_2$  можно было бы определять графически непосредственно из диаграммы: первую — как длину перпендикуляра  $LN$ , опущенного из конца вектора тока (точка  $L$ ) на ось  $O_1 X$ , а вторую — как часть этой длины, заключенную между точкой  $L$  и линией  $P_2 = 0$ , т. е. прямой  $OA$ .

Кроме того, величину к. п. д. также можно было бы получить из диаграммы путем построения шкалы к. п. д., похожего на построение шкалы скольжения.

Однако точность всех этих определений настолько невелика, что практически они не применяются. Поэтому ГОСТ 7217-54 предписывает определять к. п. д., а вместе с ним — и подводенную мощность по отдельным потерям так, как это было указано при обработке результатов опыта снятия рабочей характеристики.

Для определения максимального вращающего момента следует построить новый круг по потерям  $P_{K1}$  и току  $I_{K1}$  совершенно так же, как по потерям  $P_K$  и току  $I_K$  был построен круг для номинального режима (рис. 4-19). Конец вектора тока  $I_{K1}$  — точка  $K_1$  — неизбежно лежит вне первого круга и выше точки  $K$ . Из центра нового круга  $C_1$ , лежащего на той же прямой  $OD$ , что и центр первого круга  $C$ , проводится перпендикуляр к



построение круга тока для номинального режима и определение положения линии момента  $M=0$ , т. е. прямой  $OB$  (рис. 4-20).

За линию отдаваемой мощности  $P_2=0$  здесь принимается прямая  $OK$ , соединяющая концы векторов тока холостого хода  $I_0$  и условного тока короткого замыкания  $I_k$ . Соответственно этому длина отрезка  $l$  для построения шкалы скольжения принимается равной

$$l = \frac{\overline{KF}}{\overline{OF}} 100 [\text{см}].$$

Все прочие построения производятся точно так же, как и для двигателя с фазовым ротором.

#### 4-15. Построение круговой диаграммы двигателя с короткозамкнутым ротором с двойной клеткой или с глубоким пазом

Для построения круговой диаграммы двигателя с короткозамкнутым ротором, имеющим двойную клетку или глубокие пазы, необходимы следующие данные:

- 1) фазовый ток холостого хода  $I_0$  при номинальном напряжении и номинальной частоте;
- 2) разность между потерями холостого хода и механическими потерями  $P_0 - P_\tau$ ;
- 3) линейное напряжение короткого замыкания  $U_{\text{кн}}$  при пониженной частоте и токе, равном номинальному;
- 4) потери короткого замыкания  $P'_{\text{кн}}$  при пониженной частоте и токе, равном номинальному;
- 5) линейное напряжение короткого замыкания  $U_{\text{кн}}$  при номинальной частоте и токе короткого замыкания, равном номинальному;
- 6) потери короткого замыкания  $P_{\text{кн}}$  при номинальной частоте и токе, равном номинальному;
- 7) фазовый ток короткого замыкания  $I'_k$  при номинальной частоте, равный 2,5—3-кратному номинальному току;
- 8) линейное напряжение короткого замыкания  $U'_k$ , соответствующее току  $I'_k$ ;
- 9) потери короткого замыкания  $P'_k$ , соответствующие току  $I'_k$ ;
- 10) сопротивление одной фазы обмотки статора  $r_1$ , приведенное к  $75^\circ\text{C}$ .

Эти данные нужно подвергнуть следующей переработке:

а) вычислить условный фазовый ток короткого замыкания  $I_k$  при напряжении, во столько раз меньшем номинального, во сколько раз пониженная частота  $f'$  меньше номинальной, пользуясь формулой

$$I_k = I_n \frac{U_n}{U'_{\text{кн}}} \cdot \frac{f'}{f};$$

б) вычислить условные потери  $P'_{\text{кн}}$  по формуле

$$P'_\text{к} = P'_{\text{кн}} \left( \frac{I'_\text{к}}{I_\text{н}} \right)^2;$$

в) вычислить условный фазовый ток короткого замыкания  $I_{\text{кз}}$  при номинальном напряжении по формуле

$$I_{\text{кз}} = I_\text{н} \frac{U_\text{н}}{U_{\text{кн}}};$$

г) вычислить условные потери  $P_{\text{кз}}$  по формуле

$$P_{\text{кз}} = P_{\text{кн}} \left( \frac{I_{\text{кз}}}{I_\text{н}} \right)^2;$$

д) вычислить условный фазовый ток короткого замыкания  $I_{\text{к4}}$  при номинальном напряжении по формуле

$$I_{\text{к4}} = I'_\text{к} \frac{U_\text{н}}{U'_\text{к}};$$

е) вычислить условные потери  $P_{\text{к4}}$  по формуле

$$P_{\text{к4}} = P'_\text{к} \left( \frac{I_{\text{к4}}}{I'_\text{к}} \right)^2.$$

Перед началом построения диаграммы следует выбрать масштаб тока

$$1 \text{ мм} = A [a]$$

с таким расчетом, чтобы ток  $I_{\text{к4}}$  мог поместиться в пределах листа, и определить соответствующий масштаб мощности.

После этого, как и в предыдущих двух случаях, нужно построить вектор тока холостого хода  $I_0$  (рис. 4-21) и провести через его конец — точку  $O$  — прямую  $OG$  параллельно оси  $O_1X$  и прямую  $OD$  под углом  $\alpha$  к прямой  $OG$ , причем

$$\sin \alpha = \frac{2I_0 r_1}{U_{\text{нф}}}.$$

Затем от оси  $O_1X$  по вертикали следует отложить в масштабе мощности, уменьшенном в отношении  $f':f$ :

$$1 \text{ мм} = \frac{V\sqrt{3}U}{1000} A \frac{f'}{f} [\text{квт}],$$

условные потери  $P'_\text{к}$  и сделать на их уровень засечку из полюса  $O_1$  радиусом  $O_1K'$ , равным условному фазовому току  $I'_\text{к}$









диаграммы, основанным на том, что для двигателей одного и того же типа сохраняется более или менее неизменным отношение диаметров кругов, построенных по току холостого хода и токам короткого замыкания — действительному и условному при пониженной частоте. Для двигателей средней мощности это отношение обычно весьма близко к 1,2.

Таким образом, имея ток действительного короткого замыкания и построив для него круг радиусом  $R'$ , можно, уменьшив его диаметр в этом отношении, построить круг для пониженной частоты, которым и воспользоваться для определения данных номинального режима.

#### 4-16. Снятие зависимости вращающего момента от скорости вращения посредством торможения

Помимо снятия рабочей характеристики, которое обычно ограничивается промежутком от холостого хода до номинальной нагрузки или некоторой перегрузки, для двигателей с короткозамкнутым ротором значительный интерес представляет определение зависимости развиваемого двигателем вращающего момента от скорости вращения или от скольжения, начиная с малых скольжений нормальных эксплуатационных режимов и до полной остановки машины; в этих пределах вопрос о величине коэффициента полезного действия теряет значение, поэтому снятие такого продолжения рабочей характеристики производится упрощенным порядком.

Этот опыт отличается от опыта снятия рабочей характеристики тем, что нагрузочному генератору приходится работать с сильно изменяющейся скоростью вращения; поэтому необходимо, чтобы его номинальная мощность была значительно — в несколько раз — больше номинальной мощности испытываемого двигателя. Опыт может производиться как с поглощением энергии нагрузочного генератора в сопротивлении, так и с возвратом ее в сеть постоянного тока; в последнем случае необходимо, чтобы номинальное напряжение нагрузочного генератора было как можно больше номинального напряжения сети, на которую он работает.

Но эти два способа нагрузки не равноценны между собой. Чтобы уяснить это, необходимо обратиться к рассмотрению работы нагрузочного генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

Тормозящий момент  $M_r$ , развиваемый таким генератором, пропорционален произведению тока в якоре  $I$  на поток  $\Phi$ :

$$M_r = kI\Phi.$$

Поток  $\Phi$  в первом приближении можно считать зависящим только от тока возбуждения; при работе генератора с неизмен-

ным возбуждением на неизменное нагрузочное сопротивление ток  $I$  пропорционален э. д. с. в якоре, но так как последняя в свою очередь пропорциональна потоку  $\Phi$  и скорости вращения  $n$ , то

$$M_r = k'n\Phi^2.$$

Таким образом, для каждого значения потока зависимость момента от скорости вращения будет выражаться прямой, проходящей через начало координат, с угловым коэффициентом, пропорциональным квадрату потока (рис. 4-25).

Изменение момента генератора может осуществляться либо изменением его возбуждения при неизменной величине нагрузочного сопротивления, либо изменением нагрузочного сопротивления при неизменном возбуждении; практически же приходится обычно комбинировать оба эти способа.

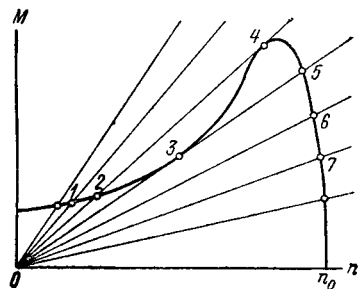


Рис. 4-25. Линии момента нагрузочного генератора при работе его на сопротивление.

Если на этом же графике отложить кривую зависимости вращающего момента испытуемого двигателя  $M_d$  от скорости вращения, то совместная работа двигателя с нагрузочным генератором будет определяться точками пересечения этой кривой с упомянутыми прямыми.

При переходе от неподвижного состояния ( $n = 0$ ;  $s = 100\%$ ) к вращению с возрастающей скоростью, совместная работа сначала вполне устойчива (точки 1, 2). Но когда двигатель достигнет точки 3, где касательная к кривой его момента совпадает с прямой момента генератора, дальнейшая устойчивая совместная работа оказывается невозможной, так как момент двигателя превышает момент генератора; поэтому двигатель, доведенный до этой точки, перейдет на устойчивую работу в точке 5, т. е. в точке пересечения кривой с продолжением этой же прямой. Все дальнейшие точки (6, 7...) являются снова устойчивыми.

Если же, наоборот, нагрузка начинается от холостого хода ( $s \approx 0$ ;  $n \approx 100\%$ ), то, дойдя до последней устойчивой точки 4, где касательная опять совпадает с одной из прямых, двигатель переходит на работу в точке 2, в которой кривая пересекается с этой прямой. Таким образом, промежуток между точками 3 и 4 для данного способа нагрузки является областью неустойчивой работы и не может быть исследован.

Совершенно иное имеет место в случае возвратной работы нагрузочного генератора. Здесь ток якоря генератора равен раз-

ности между его э. д. с.  $E$  и напряжением  $U$  той сети, на которую он работает, разделенной на сумму сопротивлений последовательной цепи генератора:

$$I = \frac{E - U}{\sum r}.$$

При неизменном возбуждении каждая из этих величин соответствует некоторой определенной скорости вращения генератора:

$$E = kn_E \Phi; \quad U = kn_U \Phi.$$

Таким образом, можно написать:

$$M_r = k' (n_E - n_U) \Phi^2;$$

это значит, что момент генератора изображается наклонной прямой, пересекающей ось абсцисс в точке  $n_E = n_U$  с угловым коэффициентом, пропорциональным квадрату потока. И здесь изменение момента генератора может осуществляться двояко: либо изменением возбуждения при неизменном напряжении сети, либо изменением напряжения сети при неизменном возбуждении генератора.

Если при нагрузке генератора на сопротивление оба способа изменения момента приводят к одному и тому же результату — все линии момента остаются направленными на начало координат, — то при возвратной работе через отдельную систему, напряжение которой может быть произвольно изменено, возбуждение при всех режимах остается неизменным и все линии моментов примерно параллельны друг другу, как на рис. 4-26. Но при работе на общую сеть с неизменным напряжением переход с одной линии момента на другую может осуществляться только с изменением возбуждения, и при более высоких возбуждениях (при пониженных скоростях вращения генератора) линии момента становятся более отвесными, как на рис. 4-27. В обоих случаях все точки пересечения линий моментов нагрузочного генератора с кривой момента испытываемого двигателя являются устойчивыми; в первом из них возможно получение точек не только при сколь угодно малых скоростях, но и при обратном вращении, т. е. в режиме тормоза; во втором нижний предел скорости определяется пределом возбуждения нагрузочного генератора — когда последнее поднято до наибольшей допустимой величины, дальнейшее понижение скорости становится невозможным.

Так как большинство способов измерения скольжения пригодно только для небольших скольжений, в этом опыте обычно измеряется непосредственно скорость вращения.

Если требуется измерение абсолютного значения развиваемого двигателем вращающего момента, то для нагрузки удобно применение балансирующего генератора постоянного тока с измерением момента посредством динамометра; однако может быть применен и обычный тарированный генератор, в особенности когда работа производится при неизменном возбуждении. Тарирование должно включать в себя определение зависимости потерь в стали якоря при данном возбуждении и механических потерь от скорости вращения.

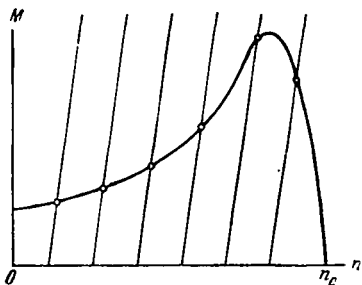


Рис. 4-26. Линии момента нагрузочного генератора при работе с неизменным возбуждением на сеть с изменяющимся напряжением.

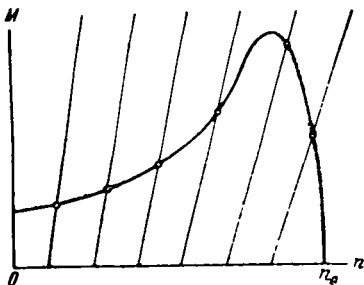


Рис. 4-27. Линии моментов нагрузочного генератора при работе с изменяющимся возбуждением на сеть с неизменным напряжением.

Мощность, подведенная к тарированному генератору, определяется как сумма отдаваемой им мощности и потерь, вычисленных по правилам, рассмотренным в § 2-18 в связи с определением к. п. д. генераторов постоянного тока.

На испытываемом двигателе подлежат измерению приложенное напряжение, потребляемый ток и подводимая мощность. Обработка полученных данных ограничивается вычислением коэффициента мощности; определение полезной мощности тем способом, который применяется при обработке результатов опыта снятия рабочей характеристики, здесь не может быть произведено, так как при больших скольжениях этот способ становится недействительным ввиду нарушения допущений, которые положены в его основу — постоянства потерь в стали и механических потерь, а также способа учета добавочных потерь.

Главной задачей опыта является определение отношения максимального (или «прокидывающего») вращающего момента к номинальному; наименьшее допустимое значение этого отношения устанавливается нормами. Второй задачей является определение отношения минимального вращающего момента в процессе пуска к номинальному моменту, которое также уста-

новлено нормами. Наконец, третьей задачей опыта является определение формы кривой момента на всем ее протяжении от неподвижного положения ротора до скорости, соответствующей максимальному моменту, в частности выявление паразитных моментов от высших гармонических вращающегося поля.

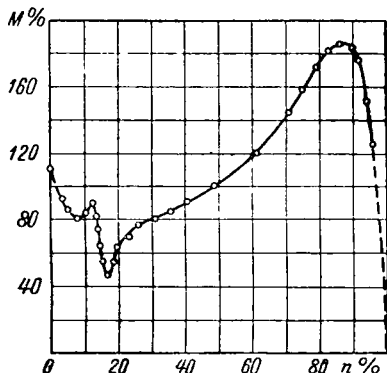


Рис. 4-28. Пример кривой момента асинхронного двигателя.

В качестве примера на рис. 4-28 представлена опытная кривая момента асинхронного двигателя, на которой видно влияние добавочного паразитного момента от седьмой гармонической; синхронная скорость этой гармонической равна  $1/7$  синхронной скорости основного поля.

Если мощность испытуемого двигателя настолько велика, что торможение его при номинальном напряжении не может быть осуществлено средствами испытательной станции, опыт

снятия кривой момента может быть произведен при пониженном напряжении. В этом случае все измеренные значения моментов должны быть пересчитаны в отношении квадратов номинального и приложенного напряжений; однако полное подобие кривой момента не сохраняется по той причине, что параметры двигателя зависят от тока, а следовательно, и от напряжения.

Длительное вращение испытуемого двигателя с сильно пониженными скоростями невозможно, так как ведет к быстрому перегреванию обмоток статора и ротора; поэтому опыт необходимо прерывать для охлаждения двигателя, лучше всего после каждого отсчета.

Если нагрузочный генератор работает на сопротивление, то охлаждение осуществляется отключением нагрузки, после которого двигатель разгоняется до скорости, близкой к синхронной; перед новым отсчетом предварительно устанавливается новая нагрузка — либо изменением величины нагрузочного сопротивления, либо изменением возбуждения нагрузочного генератора, после чего нагрузка включается, происходит быстрое затормаживание двигателя и производится отсчет.

Если же нагрузочный генератор работает на сеть, то цепь его должна оставаться все время ненарушаемой, так как подключение нагрузочного генератора к сети и последующее доведение нагрузки до требуемой величины является недопустимой

задержкой. В этом случае снятие нагрузки осуществляется отключением питания испытываемого двигателя; перед новым отсчетом устанавливается новая нагрузка путем изменения возбуждения нагрузочного генератора или напряжения сети. Охлаждение двигателя при этом не столь интенсивно, так как снятие нагрузки отключением питания не только не повышает скорости вращения, но даже понижает ее, поскольку нагрузочный генератор переходит в режим двигателя.

#### 4-17. Снятие зависимости вращающего момента от скорости вращения в процессе прямого пуска

Предельная мощность двигателя, для которого может быть применен описанный выше метод снятия зависимости вращающего момента от скорости вращения, зависит от возможностей оборудования испытательной станции; во всяком случае, она всегда не очень высока. Поэтому для испытания более крупных двигателей приходится обращаться к таким методам, которые позволяют определить эту зависимость, не прибегая к нагрузке двигателя. Таким методом является прямой пуск двигателя вхолостую от номинального или пониженного напряжения, сопровождаемый записью всех характерных для пуска величин.

При этом почти весь вращающий момент  $M$ , развиваемый двигателем (кроме небольшой его части  $M_{\tau} + M_d$ , идущей на преодоление трения всех видов и на покрытие добавочных потерь), идет на увеличение скорости вращения; а так как масса вращающихся частей остается неизменной, то в каждый данный момент времени ускорение ротора пропорционально развиваемому им вращающему моменту, за вычетом моментов трения и добавочных потерь:

$$M - M_{\tau} - M_d = \frac{\pi G D_d^2}{30 \cdot 4g} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{G D_d^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести, а  $G D_d^2$  — маховой момент двигателя.

Если пусковой период слишком мал, его можно увеличить двумя способами: либо посредством увеличения вращающейся массы (насадка тяжелого маховика, сопряжение с другой машиной), либо путем понижения напряжения.

Здесь следует сделать ряд пояснений. Момент трения  $M_{\tau}$  и момент добавочных потерь  $M_d$  невелики по сравнению с номинальным моментом двигателя, а потому и с пусковым моментом, поскольку последний имеет один порядок с номинальным при условии, что пуск производится при номинальном или близком к нему напряжении.

Но если пуск производится при сильно пониженном напряжении, положение резко изменяется. Развиваемый двигателем



вращающий момент можно считать пропорциональным квадрату напряжения (если пренебречь изменением параметров в зависимости от напряжения и тока). Так же зависит от напряжения и момент добавочных потерь; следовательно, надо считать, что он составляет при всех напряжениях одну и ту же долю развиваемого момента. Между тем момент трения не зависит от напряжения; поэтому при сильном понижении напряжения его доля в общей величине момента заметно возрастает.

Момент трения зависит от скорости вращения сложным образом; с достаточной степенью точности можно считать, что та его часть, которая определяется трением в подшипниках, постоянна при всех скоростях вращения, кроме случая подшипников скольжения (при которых, как известно, во время трогания с места коэффициент трения значительно превосходит примерно постоянную величину, характерную для вращающейся машины). Между тем та часть момента трения, которая определяется вентиляционными потерями, возрастает пропорционально квадрату скорости вращения. В различных машинах соотношение этих двух частей может изменяться в очень широких пределах, причем разделение механических потерь на вентиляционные потери и потери в подшипниках требует кропотливой и трудоемкой работы.

Отсюда следует, что увеличение пускового периода за счет понижения напряжения допустимо производить лишь до тех пор, пока моментом трения еще можно пренебречь.

С другой стороны, понижение напряжения ведет к изменению параметров машины, что отражается на величине момента, развиваемого двигателем.

Таким образом, во всех отношениях предпочтителен пуск при номинальном напряжении.

Запись процессов во время пуска в зависимости от его продолжительности может производиться различными способами.

1. Наиболее быстро протекающие процессы поддаются только записи о с ц и л л о г р а ф о м. Рекомендуются следующий состав записи:

- а) линейное напряжение;
- б) линейный ток;
- в) фазовая мощность (необязательно);
- г) скорость вращения в виде напряжения тахометрического генератора, возбуждаемого от независимого источника.

При применении вибраторов мгновенной мощности следует обратить особое внимание на тщательное нанесение нулевой линии для вибратора мощности, так как величина смещения его средней линии с нулевой получается очень небольшой вследствие низкого значения коэффициента мощности при пуске, и поэтому малейшая ошибка в нанесении нулевой линии искажает результат измерения,

На рис. 4-29 дан пример осциллограммы прямого пуска.

2. Если продолжительность пуска превосходит 0,5—1 мин, то большее удобство дает запись при помощи регистрирующих приборов; при этом желателен следующий состав записей:

а) линейное напряжение;  
б) линейный ток;  
в) мощность — в зависимости от устройства ваттметра: по схеме двух ваттметров или по схеме с естественной или искусственной нулевой точкой;

г) скорость вращения по вольтметру постоянного тока на зажимах цепи якоря тахометрического генератора.

Скорость движения лент приборов, если она поддается регулированию, должна быть выбрана так, чтобы весь процесс пуска занимал примерно от 20 до 50 см; более короткие записи трудно читать, более длинные неудобны в обработке.

При пользовании регистрирующими приборами очень важно обратить внимание на координацию отдельных записей друг с другом. Момент включения вполне отчетливо виден на записях пп. «а», «б» и «в», но момент окончания пуска, а также момент включения на записи п. «г» совсем не так отчетливы; поэтому большую пользу приносят координирующие отметки, одновременно наносимые на все записи, например до начала пуска и после его окончания.

3. Кинематографический способ записи показаний приборов вряд ли нуждается в каких-либо дополнительных разъяснениях; понятно, что при нем может быть применено любое количество измерительных приборов, в том числе и электрический секундомер, автоматически пускаемый в момент включения. Обычная скорость съемки — около 16 снимков в секунду.

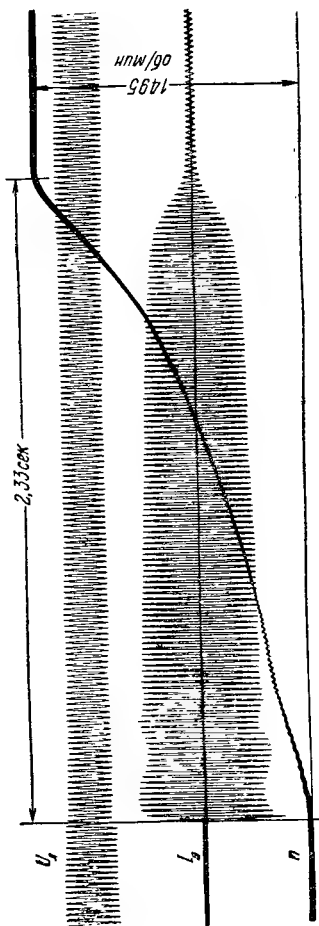


Рис. 4-29. Осциллограмма прямого пуска асинхронного двигателя.

ду — не только достаточна, но часто даже излишне велика; можно вполне удовлетвориться одним снимком в несколько секунд, что позволяет заменить киносъемочную камеру фотографическим аппаратом.

4. Если процесс пуска длится не менее 1,5—2 мин, достаточно хорошие результаты может дать способ записи по координате.

Вследствие значительности пусковых токов, даже при пуске относительно небольших двигателей не удастся обеспечить строгого постоянства напряжения источника: напряжение, резко пониженное в момент включения, постепенно восстанавливается по мере уменьшения тока; таким образом, процесс пуска протекает при повышающемся напряжении, и потому результаты опыта являются искаженными.

Условное исправление этих искажений может производиться пересчетом:

а) напряжение во все время пуска принимается неизменным, равным номинальному;

б) продолжительность пускового периода пересчитывается следующим образом: весь пусковой период подразделяется на равные промежутки и величина каждого из них пересчитывается обратно пропорционально квадрату отношения номинального напряжения к среднему напряжению на протяжении этого промежутка. Чем на большее число промежутков разделен пусковой период, тем правильнее должны получаться результаты, но зато тем труднее определение общей продолжительности пускового периода при номинальном напряжении;

в) потребляемый ток пересчитывается для каждого момента времени пропорционально отношению номинального напряжения к напряжению в данный момент;

г) подводимая мощность пересчитывается пропорционально квадрату отношения номинального напряжения к напряжению в данный момент;

д) скорость вращения никаким пересчетам не подвергается, но вместе с прочими величинами перестраивается сообразно пересчитанным промежуткам времени;

е) ускорение или вращающий момент пересчитывается пропорционально квадрату отношения номинального напряжения к напряжению в данный момент времени.

На рис. 4-30 представлено сравнение исходных и пересчитанных величин, записанных при пуске. После этого, если необходимо, все полученные величины могут быть перестроены в функции скорости вращения.

Однако возможен и другой способ графического изображения результатов опыта: по кривым пересчитанных величин определяются их значения, соответствующие различным значениям скорости или скольжения, например 10%, 20%... и т. п. Далее

выбираются масштабы тока и подводимой мощности так, как это было указано в § 4-13, и для каждого выбранного значения скорости или скольжения производится построение точки, определяющей положение конца вектора тока по соответствующим

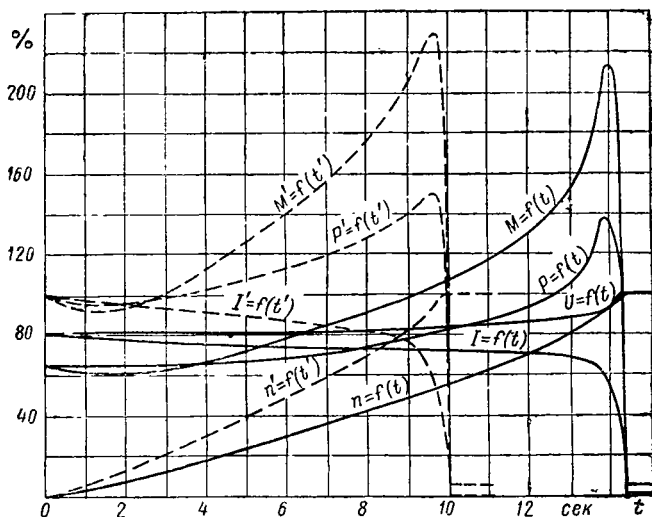


Рис. 4-30. Сравнение исходных и пересчитанных величин при прямом пуске.

Сплошные кривые — исходные данные; пунктирные кривые — пересчитанные на неизменное напряжение.

значениям тока и подводимой мощности так же, как при определении концов векторов токов во время построения диаграмм. Если соединить все полученные таким образом точки плавной линией по лекалу, то получится участок *КМ* реальной диаграммы работы двигателя в пределах от короткого замыкания (точка *К*) до максимального момента (точка *М*).

На рис. 4-31 представлена такая диаграмма, построенная по данным рис. 4-30. Кроме того, на эту диаграмму нанесены точки холостого хода (точка *О*) и номинальной нагрузки (точка *Л*), и построены два круга: круг *OLD* с центром в точке *С*, соответствующий параметрам номинальной нагрузки, и круг *OKD'* с центром в точке *С'*, соответствующий параметрам реального короткого замыкания. Как видно из графика, реальная диаграмма представляет переход с одного из этих кругов на другой.

Пусковой вращающий момент может быть получен по записанной подводимой средней мощности, если из каждого ее зна-

чения отнять потери в обмотке статора от соответствующего пускового тока и потери в стали, соответствующие данному напряжению; однако при этом трудно уловить наличие в кривой момента паразитных моментов от высших гармонических вращающегося поля.

При записи процесса пуска при помощи осциллографа или регистрирующих приборов начальная часть пускового периода сильно искажается наложением переходного процесса включения. Чтобы устранить его влияние, испытываемый двигатель

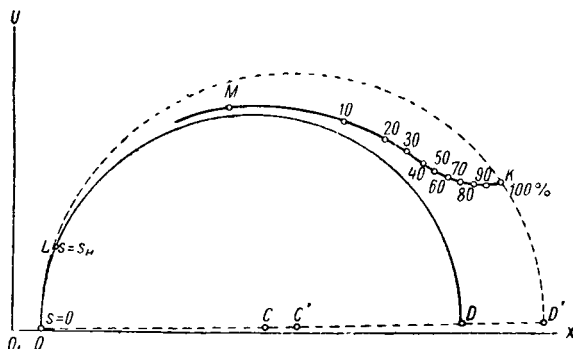


Рис. 4-31. Перестройка результатов прямого пуска в виде диаграммы.

предварительно разворачивается в противоположную сторону, после чего изменяется порядок чередования фаз питания; тогда он переходит в режим электромагнитного тормоза, на протяжении которого затухает переходный процесс включения, так что к окончанию торможения, когда двигатель, на мгновение остановившись, начнет разворачивание в нужном направлении, запись процессов будет освобождена от привходящих влияний. При подшипниках скольжения этим заодно парализуется влияние начального момента трения, что позволяет производить пуск при сильно пониженном напряжении.

Если двигатель сопряжен с какой-либо вспомогательной машиной, то разворачивание в противоположном направлении может быть произведено и ею, после чего она отключается, и двигателю подается питание сразу с нужным порядком чередования фаз.

При записи момента способами 4, 5 и 7 из перечисленных в § 1-15 переход испытываемой машины из режима электромагнитного тормоза в режим двигателя дает возможность определения масштаба для кривой момента, так как при этом развиваемый машиной вращающий момент равен начальному пусковому моменту, определяемому по характеристике короткого замыкания.

#### 4-18. Определение минимального вращающего момента в процессе пуска

Снятие полной зависимости вращающего момента от скорости вращения или скольжения не является обязательным; существенным является определение двух точек этой зависимости: максимального (или опрокидывающего) момента и минимального момента, который наблюдается на протяжении пуска.

Способы определения первого из них были рассмотрены выше; здесь дается способ определения минимального вращающего момента в процессе пуска, рекомендованный ГОСТ 7217-54, п. 42, б.

Испытываемый двигатель *ИАД* сопрягается с нагрузочной асинхронной машиной *НАМ* с короткозамкнутым ротором, имеющей в 1,5—2 раза большую мощность (рис. 4-32). Вовсе не обязательно, чтобы номинальная скорость вращения машины *НАМ* была та же, что и у испытываемого двигателя *ИАД*.

Направление вращения поля машины *НАМ* должно быть противоположно направлению вращения поля испытываемого двигателя *ИАД*; таким образом, машина *НАМ* работает в режиме электромагнитного тормоза и развиваемый ею тормозной момент может считаться не зависящим от скорости вращения.

Для регулирования величины этого момента может быть применен индукционный регулятор *ИР*, но с одинаковым успехом питание может быть подано и от отдельного синхронного генератора с устойчивой скоростью вращения и регулируемым напряжением.

Предварительно машина *НАМ* должна быть тщательно протарирована, для чего надлежит определить зависимость развиваемого ею тормозного момента от приложенного напряжения.

Опыт производится следующим образом: испытываемый двигатель *ИАД* и нагрузочная машина *НАМ* включаются одновременно; напряжение, приложенное к машине *НАМ*, должно быть подобрано таким образом, чтобы ее тормозной момент был несколько меньше начального пускового вращающего момента испытываемого двигателя, известного из его характеристики короткого замыкания.

Тормозной момент нагрузочной машины при неизменном напряжении изображается на рис. 4-33 прямой, параллельной оси абсцисс и лежащей тем ниже, чем меньше это напряжение. Разворачивание испытываемого двигателя будет происходить до тех пор, пока зависимость его вращающего момента не пересечется с такой прямой в точке 1. Если несколько понизить напряжение, приложенное к машине *НАМ*, то работа ее перейдет на новую прямую, параллельную оси абсцисс, но лежащую ниже первой; испытываемый двигатель при этом развернется до большей скорости вращения, соответствующей новой точке пересечения 2.

При дальнейшем понижении напряжения, приложенного к машине *НАМ*, точка пересечения займет положение 3, в котором прямая момента машины *НАМ* касательна к кривой момента испытываемого двигателя. Удерживаясь на этой точке работа не сможет, и двигатель развернется дальше до точки 4, которая принадлежит уже к рабочему режиму двигателя, т. е. имеет скорость вращения, близкую к номинальной. Тормозной момент, развиваемый при этом машиной *НАМ*, равен искомому минимальному вращающему моменту испытываемого двигателя в процессе пуска.

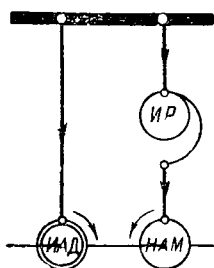


Рис. 4-32. Схема опыта для определения минимального момента.

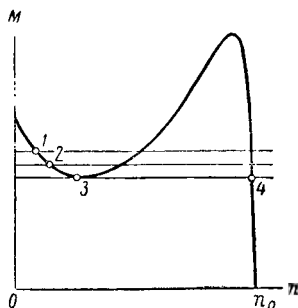


Рис. 4-33. Равновесие моментов при опыте для определения минимального момента.

Искусство проведения этого опыта состоит в том, чтобы быстро и четко устанавливать требуемое напряжение на нагрузочной машине, так как обе машины — и испытываемый двигатель и нагрузочная машина — быстро нагреваются.

Можно вести опыт и обратным порядком — путем постепенного повышения напряжения, приложенного к машине *НАМ*, определить тот тормозной момент, при котором испытываемый двигатель перестает разворачиваться до скорости вращения рабочего режима; эта операция потребует трех-четырех пусков, пока нужная величина напряжения будет отыскана. Если при этом двигатель *ИАД* и машина *НАМ* перегреются, их можно остудить, сняв с машины *НАМ* напряжение и предоставив двигателю *ИАД* развернуться до полной скорости вращения без нагрузки.

Величина минимального вращающего момента в процессе пуска установлена: для двигателей общего применения мощностью от 0,6 до 100 *квт* — в ГОСТ 186-52, п. 6; для двигателей

мощностью выше 100 *квт* — в ГОСТ 183-55, п. 13; для двигателей мощностью от 10 до 600 *вт* — в ГОСТ 8212-56, п. 6; для рудничных взрывобезопасных двигателей мощностью от 0,4 до 100 *квт* — в ГОСТ 6661-53, п. 6.

Никакого допускаемого отклонения для величины минимального момента стандартами не установлено.

#### 4-19. Особенности испытания серийных двигателей

При массовом производстве двигателей вопрос о правильной организации контрольных испытаний приобретает очень важное значение, так как при больших количествах машин, поступающих на испытательную станцию, каждой из них может быть уделено только очень небольшое время. Поэтому количество отдельных операций должно быть наименьшим возможным.

С этой точки зрения целесообразно принять следующий порядок проведения испытаний:

- 1) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса;
- 2) измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;
- 3) определение коэффициента трансформации (для двигателей с фазовым ротором);
- 4) прогрев подшипников при холостом ходе с номинальным или пониженным напряжением в течение не менее 15 *мин* для двигателей до 10 *квт* и не менее 30 *мин* для двигателей от 10 до 100 *квт*;
- 5) измерение тока и потерь холостого хода при напряжении, близком к номинальному;
- 6) испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток;
- 7) измерение тока и потерь короткого замыкания при напряжении согласно табл. 4-2;
- 8) проверка исправности обмотки ротора при коротком замыкании с током около 100% номинального (для двигателей с короткозамкнутым ротором);
- 9) испытание электрической прочности изоляции обмотки статора относительно корпуса.

Согласно ГОСТ 186-52, п. 22, для двигателей общего применения мощностью до 10 *квт* включительно при скорости вращения 3000 *об/мин*, до 7 *квт* включительно при скорости вращения 1500 *об/мин* и до 4,5 *квт* включительно при скорости вращения 1000 *об/мин* — допускается производить измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и испытание электрической прочности междувитковой изоляции обмоток выборочно в количестве не менее 1% от суточной выработки.



Такой же выборочный порядок испытания допускается, согласно ГОСТ 6661-53, п. 21, для рудничных взрывобезопасных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 8 кВт при скорости вращения 1500 об/мин и до 5 кВт при скорости вращения 1000 об/мин, и, согласно ГОСТ 8212-56, п. 20, для двигателей мощностью от 10 до 600 вт; кроме того, последний стандарт разрешает также выборочное определение тока и потерь холостого хода и короткого замыкания.

Однако двигатели крановые, подъемно-транспортные и металлургические, согласно ГОСТ 185-53, п. 25, независимо от мощности должны подвергаться сплошной проверке по этим двух пунктам программы.

Кроме перечисленных, в программу контрольных испытаний должно быть включено испытание при повышенной скорости вращения для следующих категорий двигателей:

а) двигатели с короткозамкнутым ротором мощностью выше 100 кВт при скорости вращения 3000 об/мин — на основании соображений, изложенных в § 4-5;

б) двигатели крановые, подъемно-транспортные и металлургические — согласно ГОСТ 185-53, п. 25;

в) двигатели с фазовым ротором всех мощностей, хотя это требование и не обусловлено ни одним из действующих стандартов.

В распоряжении испытательной станции должны иметься сверенные с расчетными данными результаты подробных типовых испытаний всех типов двигателей, проходящих контрольные испытания.

Сравнение результатов контрольных испытаний с типовыми производится в отношении следующих величин:

1. Сопротивление обмотки статора не должно отличаться от расчетного, проверенного типовым испытанием, более, чем это допускается нормами, установленными на данном предприятии (обычно до 8%).

Так как сопротивления обмоток двигателей, проходящих контрольные испытания, измеряются при различной температуре, то для быстроты сравнения полезно заранее подготовить табличку или график допускаемых значений сопротивления в зависимости от температуры.

2. Ток холостого хода не является нормированной величиной, но от него зависит коэффициент мощности машины при номинальной нагрузке. Для каждого типа машины должно быть заранее установлено, при каком предельном значении тока холостого хода коэффициент мощности при номинальной нагрузке не выходит из пределов допустимого.

Отклонение тока холостого хода от нормального значения может происходить по различным причинам, основными из которых являются:

- а) отступление в числе витков обмотки статора;
- б) отступление в количестве (или качестве) стали сердечника статора, а частично и ротора;
- в) отступление в величине воздушного зазора.

3. Потери холостого хода также не являются нормированными, но от них в сильной степени зависит коэффициент полезного действия, и потому для каждого типа машины должны быть установлены предельные их значения, при которых к. п. д. не выходит из допустимых пределов.

Основными причинами отклонения потерь холостого хода от нормальных являются:

- а) отступление в числе витков обмотки статора;
- б) отступление в количестве (или качестве) стали сердечника статора;
- в) ненормальное трение в подшипниках или ненормальности в вентиляционной системе.

Не всегда удается организовать рабочее место так, чтобы определение тока и потерь холостого хода производилось точно при номинальном значении напряжения; поэтому предельные допустимые их значения должны быть подготовлены в виде таблиц или графиков для различных значений напряжения внутри тех пределов, в которых оно может отличаться от номинального, обычно  $\pm 5\%$ .

4. Ток короткого замыкания является нормированной величиной; чрезмерно большой ток может оказаться выходящим из пределов, указанных нормами, но при чрезмерно малом токе понижаются максимальный момент двигателя, коэффициент мощности и к. п. д. Поэтому отклонения его в обе стороны от нормального должны быть ограничены.

Главнейшими причинами отклонения тока короткого замыкания являются:

- а) отступление в числе витков обмотки статора;
- б) неисправность обмотки ротора.

5. Потери короткого замыкания нормированы косвенно — через начальный пусковой вращающий момент, который должен быть не ниже определенного нормами.

Из числа причин отклонения потерь короткого замыкания от их нормальной величины главными являются:

- а) отступление в числе витков обмотки статора;
- б) отступление в сечении обмотки статора;
- в) неисправность обмотки ротора.

Необходимо заранее подготовить графики или таблицы зависимостей допустимых значений тока и потерь короткого замыкания от приложенного напряжения в пределах возможного отклонения его от значений, предписанных табл. 4-2.

Задача определения допустимых пределов отклонения параметров контрольного испытания, т. е. тока и потерь холостого

хода, тока и потерь короткого замыкания от значений, при которых двигатель данного типа полностью удовлетворял бы всем требованиям, предъявляемым к нему стандартами в отношении экономических и эксплуатационных показателей — коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, кратности начального пускового тока, кратности начального пускового вращающего момента и кратности максимального вращающего момента,— является достаточно сложной.

Затруднения, стоящие на пути решения этой задачи, состоят прежде всего в том, что ни одна из перечисленных величин, нормированных стандартами, не определяется из контрольных испытаний непосредственно. Следовательно, необходимо найти функциональные связи, определяющие зависимость этих величин от параметров контрольного испытания.

Некоторые из этих связей определяются довольно легко; так, начальный пусковой ток и начальный пусковой вращающий момент нетрудно найти путем сравнения измеренных значений тока и потерь короткого замыкания с результатами достаточно тщательно проведенного опыта короткого замыкания при типовом испытании.

Другие, напротив, определяются с большим трудом прежде всего потому, что являются функцией сразу нескольких параметров. Так, к. п. д. при номинальной нагрузке зависит сложным образом от четырех параметров — тока и потерь холостого хода, тока и потерь короткого замыкания. Коэффициент мощности при номинальной нагрузке зависит от тока холостого хода, тока короткого замыкания и, в меньшей степени, от потерь короткого замыкания. Максимальный вращающий момент зависит от тока и потерь короткого замыкания и, в меньшей мере, от тока холостого хода.

Другая трудность состоит в том, что большей частью улучшение одного показателя вызывает ухудшение других. Таким образом, предельное допустимое значение каждого параметра контрольного испытания зависит от уровня остальных параметров, что и служит основным препятствием к установлению таких предельных значений.

В этом отношении значительный интерес представляет попытка установить сопряженные пределы допустимых значений параметров контрольного испытания, предпринятая О. Д. Гольдбергом. Для этого предлагается оценивать соответствие данного двигателя требованиям стандартов путем построения трех областей допустимых соотношений параметров контрольного испытания:

- а) тока холостого хода  $I_0$  и тока короткого замыкания  $I_k$ ;
- б) потерь холостого хода  $P_0$  и потерь короткого замыкания  $P_k$ ;

в) тока короткого замыкания  $I_k$  и потерь короткого замыкания  $P_k$ .

Двигатель считается удовлетворяющим требованиям стандарта, если ни один из сопряженных параметров не выходит из пределов этих трех областей, границы которых определяются заранее для каждого типа двигателей на основании результатов типовых испытаний и материалов расчета.

Первая из этих областей (рис. 4-34) ограничена слева наклонной прямой  $CF$ , левее которой двигатель не будет развивать необходимого вращающего момента с учетом допускаемого

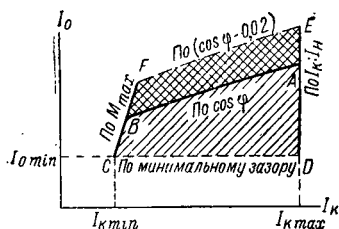


Рис. 4-34. Область  $I_0 - I_k$ .

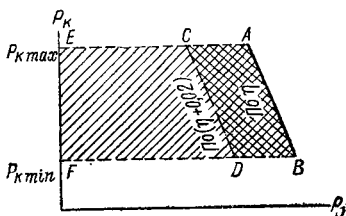


Рис. 4-35. Область  $P_0 - P_k$ .

отклонения по ГОСТ 183-55, п. 30; справа — вертикальной прямой  $DE$ , правее которой двигатель будет иметь чрезмерный начальный пусковой ток, также с учетом допускаемого отклонения; сверху — двумя кривыми  $AB$  и  $EF$ , нижняя из которых представляет предел по наименьшему допускаемому значению коэффициента мощности (с учетом допускаемого отклонения), а верхняя — аналогичный предел для двигателей, имеющих коэффициент мощности ниже допускаемого на 0,02 при условии, что произведение к. п. д. и коэффициента мощности не меньше результата перемножения предписанных значений этих показателей, уменьшенных на величину допускаемых отклонений по ГОСТ 183-55, п. 30. Таким образом, часть области, заключенная между этими двумя кривыми (заштрихованная накрест), представляет область сомнительных случаев, нуждающихся в более внимательной проверке, поясненной ниже. Нижняя граница области — горизонтальная пунктирная прямая  $CD$  — является условной границей, устанавливаемой по минимальному воздушному зазору, допустимому для данного типа двигателей по конструктивным соображениям.

Вторая область (рис. 4-35) ограничена справа наклонной прямой  $AB$ , правее которой двигатель будет иметь к. п. д. ниже предписанного значения с учетом допускаемого отклонения. Параллельно ей и левее ее проходит прямая  $CD$ , левее которой

двигатель будет иметь к. п. д., на 0,02 больший предписанного значения с учетом допускаемого отклонения. Если данный двигатель попадает на рис. 4-34 в перекрестно заштрихованную часть области, т. е. имеет коэффициент мощности ниже предписанного (с учетом допускаемого отклонения) до 0,02, то он может быть признан удовлетворяющим требованиям стандарта лишь в том случае, когда на рис. 4-35 он определяется точкой, лежащей левее прямой  $CD$ , т. е. когда его к. п. д. выше предписанного (также с учетом допускаемого отклонения) на ту же величину, т. е. на 0,02.

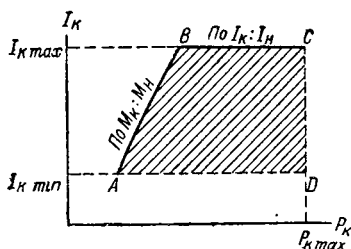


Рис. 4-36. Область  $I_k - P_k$ .

проведения дополнительного испытания в виде снятия рабочей характеристики, а если это нужно, — то и испытания на нагревание.

Сверху и снизу область рис. 4-35 ограничена горизонтальными пунктирными прямыми  $AE$  и  $BF$  в соответствии с наблюдаемым разбросом значений потерь короткого замыкания. Слева она практически не ограничена.

Третья область (рис. 4-36) слева ограничена кривой  $AB$ , левее которой двигатель имеет недостаточный начальный пусковой вращающий момент, а сверху — горизонтальной прямой  $BC$ , выше которой он имеет чрезмерный начальный пусковой ток. Справа условной границей области служит вертикальная пунктирная прямая  $CD$ , проведенная в соответствии с верхней границей области рис. 4-35, а снизу — горизонтальная пунктирная прямая  $AD$ , условно установленная по наименьшему допустимому току короткого замыкания в области рис. 4-34 (соответственно точке  $C$  этой области).

Ограниченность места не позволяет рассмотреть здесь приемы построения границ всех трех областей для каждого данного типа двигателя вследствие их достаточной сложности.

Некоторым недостатком описанной системы является необходимость измерения тока и потерь холостого хода точно при номинальном напряжении, а тока и потерь короткого замыкания — точно при напряжении по табл. 4-2, что требует применения источников питания с устойчивым и тонко регулируемым напряжением или введения поправок к измеренным величинам на отклонение напряжения от заданного.

При массовом производстве двигателей существенное значе-

ние имеет вопрос о порядке отбора двигателей для проведения типовых испытаний. Указания по этому вопросу имеются в трех специализированных стандартах на асинхронные двигатели.

Согласно ГОСТ 8212-56, п. 20, для двигателей мощностью от 10 до 600 *вт* и ГОСТ 6661-53, п. 23, для рудничных взрывобезопасных двигателей мощностью от 0,4 до 100 *квт* такие испытания должны производиться не реже одного раза в год, причем для них отбираются количества двигателей, определяемые этими стандартами в зависимости от номинальной мощности.

Несколько иначе этот вопрос решен в ГОСТ 185-53, п. 26, согласно которому для крановых, подъемно-транспортных и металлургических двигателей не менее 5% всех выпускаемых двигателей одного исполнения должны подвергаться испытанию на нагревание в определенном кратковременном режиме работы, а согласно п. 27 — из их числа один раз в год должно отбираться для проведения полного испытания не менее двух двигателей.

В остальных случаях порядок отбора двигателей для типовых испытаний должен определяться техническими условиями на эти двигатели.

#### **4-20. Испытание синхронных двигателей в качестве асинхронных**

Современные синхронные двигатели строятся для асинхронного пуска — прямого в том случае, когда обмотка якоря сразу подключается к напряжению источника, или непрямого, когда в процессе пуска применяются какие-либо устройства, имеющие своим назначением уменьшение пусковых токов; эти устройства могут быть как внутри машины (например пуск посредством подразделения обмотки на параллельные ветви), так и вне ее (пуск через автотрансформатор, реактор и т. д.).

Под пусковыми характеристиками в узком смысле слова понимается отношение начального пускового тока к номинальному и начального пускового момента к номинальному при условии прикладывания к зажимам машины номинального напряжения вне зависимости от того, каким способом предполагается пускать двигатель в эксплуатации; однако, если устройства, направленные к понижению пускового тока, входят в конструкцию машины, причем по окончании процесса пуска выводятся из действия, уместно определять пусковые характеристики двояко — с действующими пусковыми устройствами и без них.

По технике выполнения опыт определения этих двух величин не отличается от опыта короткого замыкания асинхронного двигателя, описанного в § 4-7.

Следует лишь заметить, что по причине неодинакового расположения полюсов индуктора по отношению к разным фазам обмотки якоря токи в этих последних сильно отличаются друг от друга даже при неявновыраженных полюсах; это заставляет

производить измерение их обязательно во всех фазах. Кроме того, так как неравенство токов влечет за собой и неравенство напряжений на зажимах, то приходится не довольствоваться измерением только одного из них, а измерять все три линейные напряжения.

За действительные значения напряжения и тока принимаются средние арифметические из всех измеренных значений.

Что же касается подведенной мощности, то для ее измерения следует применять по крайней мере способ двух ваттметров; но еще больше можно рекомендовать здесь способ трех ваттметров, в особенности, если нулевая точка обмотки якоря доступна.

Неравенство токов в фазах имеет своим следствием неравенство потерь в них; поэтому последние должны определяться для каждой фазы отдельно.

Как и в случае средних и крупных асинхронных двигателей, опыт немисливо проводить при номинальном напряжении; приходится довольствоваться напряжением, пониженным настолько сильно, чтобы ток короткого замыкания был в пределах от 100 до 200% номинального; полученные значения пускового тока пересчитываются пропорционально напряжению с поправкой на насыщение, а значения пускового момента — пропорционально квадрату тока.

Обмотка индуктора во время этого опыта не должна оставаться разомкнутой, так как в противном случае на ней возникли бы опасные перенапряжения. При любом способе асинхронного пуска она замыкается на разрядное сопротивление, величина которого берется обычно от 5 до 10 раз больше сопротивления обмотки индуктора.

Если машина комплектуется таким сопротивлением, то оно и должно быть включено во время опыта; кроме того, следует включить последовательно с ним трансформатор тока для измерения тока в цепи индуктора.

Уменьшение величины разрядного сопротивления ведет к увеличению пускового тока, тем более заметному, чем слабее пусковые клетки в полюсных башмаках индуктора.

Ввиду отмеченного выше неравенства токов в фазах и линейных напряжений было бы затруднительно применить результаты опыта короткого замыкания для построения диаграммы. Поэтому определение пусковых характеристик предпочтительно производить путем записи процесса пуска, преимущественно при помощи осциллографа.

При этом нормальным может считаться следующий состав записи:

- а) приложенное линейное напряжение;
- б) потребляемый линейный ток;
- в) подводимая фазовая мощность (необязательно);

г) ток в обмотке индуктора или напряжение на зажимах разрядного сопротивления;

д) скорость вращения в виде напряжения тахометрического генератора (необязательно).

Пример такой осциллограммы представлен на рис. 4-37.

Особенностью подобной записи является то, что скорость вращения с удовлетворительной точностью может быть построена по току индуктора или напряжению на разрядном сопротивлении, которые очень наглядно представляют относительное вращение индуктора в магнитном поле.

Если, пользуясь записью приложенного напряжения, как отметками времени, построить зависимость непрерывно возрастающего угла поворота индуктора в магнитном поле от времени по записи тока или напряжения индуктора (рис. 4-38), и затем каждую ординату полученной таким образом кривой 1 вычесть из соответствующей ординаты прямой 2, представляющей непрерывно и равномерно возрастающий угол поворота вращающегося поля в пространстве, выраженный в оборотах или долях оборота, то полученная таким образом кривая 3 будет представлять зависимость от времени непрерывно возрастающего угла поворота индуктора в пространстве. Дифференцирование последней даст зависимость скорости вращения индуктора от времени, выраженную в оборотах в минуту.

После этого, если встречается необходимость, все прочие величины приводятся к неизменному напряжению так, как это было указано в § 4-17. Тогда все величины, относящиеся к пуску, могут быть перестроены в зависимости от скорости вращения.

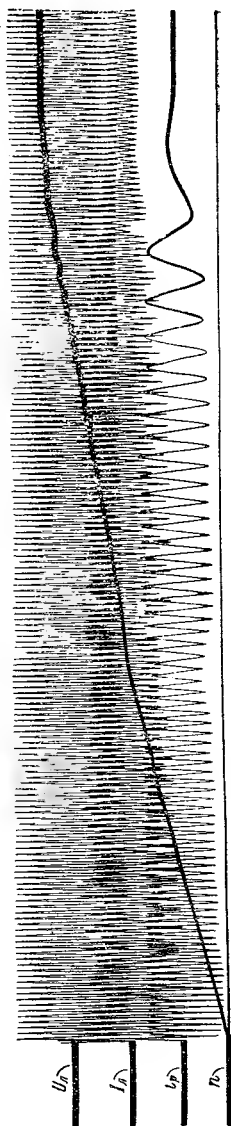


Рис. 4-37. Осциллограмма прямого пуска синхронного двигателя.



Кратность начального пускового тока, начального пускового вращающего момента и максимального вращающего момента в процессе пуска для синхронных двигателей стандартами не нормирована.

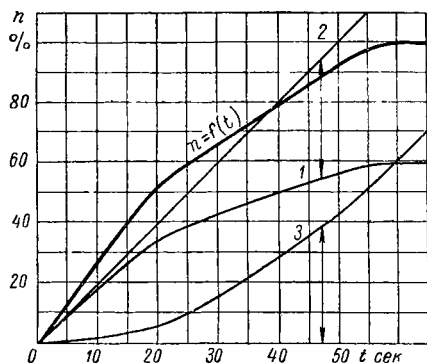


Рис. 4-38. Построение зависимости скорости вращения от времени.

#### 4-21. Особенности испытания двигателей однофазного тока

Всякий асинхронный двигатель трехфазного тока при размыкании одного из питающих проводов может быть превращен в двигатель однофазного тока; известно, однако, что такой двигатель при однофазном питании не может самостоятельно начать вращаться.

Поэтому так называемые двигатели однофазного тока отличаются тем, что снабжаются приспособлениями, позволяющими им иметь в неподвижном состоянии начальный пусковой вращающий момент, достаточный для трогания с места не только вхолостую, но и при некоторой нагрузке.

Такое приспособление обычно представляет специальную обмотку, включаемую последовательно с активным сопротивлением или емкостью; нередко в качестве этой обмотки применяется третья фаза нормальной трехфазной обмотки.

Многочисленные существующие схемы включения пусковых обмоток можно разделить на две группы: схемы, в которых пусковая обмотка по окончании пуска отключается, и схемы, в которых она продолжает оставаться включенной и по окончании пуска во все время работы двигателя.

Испытание двигателей со схемами первой группы по исполнению отличается только тем, что измерения производятся в цепи однофазного тока, следовательно с минимальным количеством измерительных приборов. Снятие характеристики холостого хода и рабочей характеристики и испытание на нагревание производятся точно так же, как и для двигателя трехфазного тока; обработка результатов этих опытов отличается только тем, что потери в обмотке статора принимаются равными произведению квадрата потребляемого тока на сопротивление всей рабочей обмотки при соответствующей температуре, а при подсчете коэффициента полезного действия ГОСТ 183-55, п. 44.

предписывает вычислять основные потери в обмотке ротора как удвоенное произведение скольжения, выраженного в долях единицы, на электромагнитную мощность:

$$P_{\text{м2}} = \frac{2P_{\text{эм}}s}{100} = \frac{2(P_1 - I^2 r_{\text{гб}} - P_{\text{ст}})s}{100}.$$

Что касается характеристики короткого замыкания, то и она может быть снята так же, как в случае двигателя трехфазного тока; но обработка ее результатов ограничивается определением начального пускового тока рабочей обмотки при отключенной пусковой обмотке, что представляет только второстепенный интерес, а определение начального пускового момента в этих условиях произведено быть не может, поскольку он равен нулю.

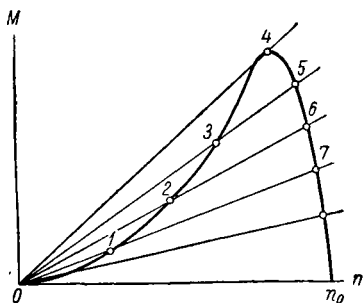


Рис. 4-39. Кривая момента однофазного двигателя.

Данные такого опыта короткого замыкания могли бы быть использованы для построения круговой диаграммы, однако последнее не имеет промышленного значения потому, что двигатели однофазного тока сколько-нибудь крупной мощности, нуждающиеся в определении эксплуатационных показателей при помощи диаграммы, обычно не встречаются, и это определение может и должно производиться непосредственно. Так, например, зависимость вращающего момента от скорости вращения может быть снята способом торможения, описанным в § 4-16. При всех способах нагрузки опыт нужно вести, переходя от наибольшей скорости к меньшим; предпочтение следует отдать работе нагрузочного генератора на сеть, так как при работе его на сопротивление (рис. 4-39) можно довести двигатель увеличением нагрузки только до опрокидывания (точка 4), после которого он останавливается, поскольку соответствующая линия момента нагрузочного генератора не пересекается с кривой момента двигателя.

Определение начального пускового момента должно производиться при включенной пусковой обмотке методом непосредственного измерения; общая величина тока, потребляемого рабочей и пусковой обмотками, представляет его начальное пусковое значение.

Определение зависимости вращающего момента от скорости вращения может быть произведено при включенной пусковой обмотке любым из непосредственных методов, применяемых для двигателей трехфазного тока, в частности минимальный вра-

щающий момент в процессе пуска может быть определен методом, описанным в § 4-18.

Испытание двигателей со схемами второй группы должно производиться при рабочем соединении обмоток и пусковых приспособлений. Ток и мощность в цепи рабочей обмотки и в цепи пусковой обмотки должны измеряться порознь, но кроме того, желательно измерение и их общих величин. Потери в цепи пусковой обмотки при подсчете к. п. д. должны учитываться так, чтобы электромагнитная мощность определялась совместным действием обеих обмоток. Если в цепи пусковой обмотки применяется конденсатор, то потерями в цепи можно пренебречь; но если применяется невыключаемое сопротивление, то потери в цепи должны быть учтены наравне с основными потерями в пусковой обмотке.

---

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Испытательные напряжения при испытании электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками

(Извлечение из ГОСТ 183-55, п. 27)

| № п/п. | Электрическая машина или ее части                                                                                                                                                                                | Испытательное напряжение<br>(действующее значение)                                                                                                 |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Машины мощностью менее 1 <i>квт</i> (или 1 <i>ква</i> ), а также все машины на номинальное напряжение не свыше 36 <i>в</i>                                                                                       | 500 <i>в</i> плюс двукратное номинальное напряжение                                                                                                |
| 2      | Машины мощностью от 1 <i>квт</i> (или 1 <i>ква</i> ) до 3 <i>квт</i> (или 3 <i>ква</i> ) включительно при номинальном напряжении свыше 36 <i>в</i>                                                               | 1000 <i>в</i> плюс двукратное номинальное напряжение                                                                                               |
| 3      | а) Машины мощностью более 3 <i>квт</i> (или 3 <i>ква</i> ), за исключением перечисленных в п. 36 настоящей таблицы, при номинальном напряжении свыше 36 <i>в</i> .                                               | 1000 <i>в</i> плюс двукратное номинальное напряжение, но не менее 1500 <i>в</i>                                                                    |
|        | б) Машины мощностью от 1000 <i>квт</i> (или 1000 <i>ква</i> ) и выше на номинальное напряжение:<br>до 3300 <i>в</i> включительно<br><br>свыше 3300 <i>в</i> до 6600 <i>в</i> включительно<br>свыше 6600 <i>в</i> |                                                                                                                                                    |
| 4      | Обмотки возбуждения синхронных генераторов, у которых номинальное напряжение возбуждательной системы не превышает 800 <i>в</i>                                                                                   | 1000 <i>в</i> плюс двукратное номинальное напряжение<br>2,5-кратное номинальное напряжение<br>3000 <i>в</i> плюс двукратное номинальное напряжение |
| 5      | Обмотки возбуждения синхронных двигателей и синхронных компенсаторов:                                                                                                                                            | Десятикратное номинальное напряжение возбуждательной системы, но не менее 1500 <i>в</i> и не более 3500 <i>в</i>                                   |
|        | а) если машина предназначена для непосредственного пуска со стороны переменного тока с обмоткой возбуждения, замкнутой на сопротивление или на источник своего питания                                           |                                                                                                                                                    |

| № п/п | Электрическая машина или ее части                                                                                      | Испытательное напряжение<br>(действующее значение)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6     | б) то же, но предназначенная для пуска с разомкнутой обмоткой возбуждения, подразделенной на секции                    | 1000 в плюс десятикратное номинальное напряжение возбуждательной системы, но не менее 1500 в                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|       | в) то же, но предназначенная для пуска с разомкнутой обмоткой возбуждения, не секционированной                         | 1000 в плюс двадцатикратное номинальное напряжение возбуждательной системы, но не менее 1500 в и не более 8000 в                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|       | г) синхронные двигатели и синхронные компенсаторы, пускаемые специальными пусковыми двигателями                        | Десятикратное номинальное напряжение возбуждательной системы, но не менее 1500 в                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|       | Возбудители для электрических машин:                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 7     | а) возбудители для электрических машин, кроме синхронных                                                               | 1000 в плюс двукратное номинальное напряжение, но не менее 1500 в                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|       | б) возбудители для синхронных генераторов, у которых номинальное напряжение возбуждательной системы не превышает 800 в | Десятикратное номинальное напряжение, но не менее 1500 в и не более 3500 в                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|       | в) возбудители для синхронных двигателей и синхронных компенсаторов                                                    | Десятикратное номинальное напряжение, но не менее 1500 в                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 8     | Вторичные обмотки асинхронных двигателей, не находящиеся в непрерывном короткозамкнутом состоянии:                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|       | а) для двигателей, допускающих торможение противовключением                                                            | 1000 в плюс четырехкратное номинальное напряжение вторичной обмотки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|       | б) для двигателей, не предназначенных для торможения противовключением                                                 | 1000 в плюс двукратное номинальное напряжение вторичной обмотки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 8     | Собранные в группы электрические машины и аппараты                                                                     | Если испытанию подвергается группа, собранная из нескольких новых, только что установленных и соединенных вместе электрических машин и аппаратов, из которых каждая машина и каждый аппарат проходили испытания электрической прочности, то испытательное напряжение не должно превышать 85% испытательного напряжения той машины (или того аппарата), у которой это напряжение наименьшее |
|       |                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

## ПРИЛОЖЕНИЕ II

**Предельные допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре охлаждающей среды + 35° С и высоте над уровнем моря не более 1000 м**

(Извлечение из ГОСТ 183-55, п. 21)

| № п.п.             | Части электрических машин                                                                                                                                 | Изолирующий материал класса А                                                                                                                         | Изолирующий материал класса В |                    |                       |                                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                                                                                                                           | При измерении                                                                                                                                         |                               |                    |                       |                                                                                                         |
|                    |                                                                                                                                                           | методом термометра                                                                                                                                    | методом сопротивления         | методом термометра | методом сопротивления | методом заложенных и встраиваемых температурных детекторов, при укладке их между катушками в одном пазу |
| ° С, не более      |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                       |                               |                    |                       |                                                                                                         |
| 1 <sup>1</sup>     | Обмотки переменного тока синхронных машин и асинхронных машин мощностью 5000 <i>кВа</i> и выше или с длиной сердечника 1 м и более                        | —                                                                                                                                                     | —                             | —                  | 80                    | 85                                                                                                      |
| 2 <sup>2</sup> , 3 | а) Обмотки переменного тока машин мощностью менее 5000 <i>кВа</i> или с длиной сердечника менее 1 м                                                       |                                                                                                                                                       |                               |                    |                       |                                                                                                         |
|                    | б) Обмотки возбуждения (многослойные) машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3 и 4 настоящей таблицы | 60                                                                                                                                                    | 65                            | 75                 | 85                    | —                                                                                                       |
| 3                  | в) Якорные обмотки, соединенные с коллектором                                                                                                             |                                                                                                                                                       |                               |                    |                       |                                                                                                         |
|                    | а) Одноярусные обмотки возбуждения                                                                                                                        | 70                                                                                                                                                    | 70                            | 95                 | 95                    | —                                                                                                       |
|                    | б) Стержневые обмотки роторов асинхронных машин при числе стержней в пазу не более двух                                                                   | —                                                                                                                                                     | 70                            | —                  | 95                    | —                                                                                                       |
| 4 <sup>2</sup>     | Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки                                                              | 65                                                                                                                                                    | 65                            | 85                 | 85                    | —                                                                                                       |
| 5                  | Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя                                                                                                       | 65                                                                                                                                                    | —                             | 85                 | —                     | —                                                                                                       |
| 6                  | Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя                                                                                                     | Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения изолирующих или других смежных материалов |                               |                    |                       |                                                                                                         |
| 7                  | Стальные сердечники и другие части, не соприкасающиеся с обмотками                                                                                        |                                                                                                                                                       |                               |                    |                       |                                                                                                         |

Продолжение

| № п/п           | Части электрических машин                                       | Изолирующий материал класса А                                                                                                                                                                                   | Изолирующий материал класса В |                    |                       |               |                                                                                                         |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |                                                                 | При измерении                                                                                                                                                                                                   |                               |                    |                       |               | методом заложенных и встраиваемых температурных детекторов, при укладке их между катушками в одном пазу |
|                 |                                                                 | методом термометра                                                                                                                                                                                              | методом сопротивления         | методом термометра | методом сопротивления | ° С, не более |                                                                                                         |
| 8               | Стальные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками | 65° С — если изолирующий материал обмоток принадлежит к классу А, и 85° С — если изолирующий материал обмоток принадлежит к классу В и при этом для изоляции листов активной стали применен соответствующий лак |                               |                    |                       |               |                                                                                                         |
| 9               | Контактные кольца как защищенные, так и незащищенные            | 70                                                                                                                                                                                                              | —                             | 90                 | —                     | —             |                                                                                                         |
| 10 <sup>4</sup> | Коллекторы                                                      | 65                                                                                                                                                                                                              | —                             | 85                 | —                     | —             |                                                                                                         |

<sup>1</sup> Для обмоток синхронных машин на номинальное напряжение больше 11 000 в предельные допустимые превышения температуры должны быть снижены на 1° С на каждые 1000 в сверх 11 000 в.

<sup>2</sup> Одновременное измерение превышения температуры по методу термометра и по методу сопротивления не требуется. Если в дополнение к значениям, полученным по методу сопротивления, желательно иметь отчет по термометру (или встраиваемому температурному детектору), то допустимое превышение температуры по термометру (или встраиваемому температурному детектору), помещенному в наиболее горячую точку, не должно превышать 70° С — если обмотка изолирована материалами класса А, и 90° С — если обмотка изолирована материалами класса В.

<sup>3</sup> Указанные для этих обмоток пределы превышений температуры, измеренные методом сопротивления, для закрытых машин на напряжения не свыше 1500 в допускается повышать на 5° С.

<sup>4</sup> Указание класса изолирующего материала относится к изоляции обмотки, соединяемой с коллектором.

## ПРИЛОЖЕНИЕ III

Таблица поправок в процентах для приведения сопротивления медной обмотки, измеренного при температуре  $\vartheta$ , к температуре  $+15^{\circ}\text{C}$

| $\vartheta$ | 0,0   | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | $\vartheta$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 0           | 6,38  | 6,34  | 6,29  | 6,25  | 6,20  | 6,16  | 6,11  | 6,07  | 6,02  | 5,98  | 0           |
| 1           | 5,93  | 5,89  | 5,84  | 5,80  | 5,75  | 5,71  | 5,67  | 5,62  | 5,58  | 5,53  | 1           |
| 2           | 5,49  | 5,44  | 5,40  | 5,35  | 5,31  | 5,26  | 5,22  | 5,17  | 5,13  | 5,08  | 2           |
| 3           | 5,04  | 5,00  | 4,95  | 4,91  | 4,87  | 4,82  | 4,78  | 4,73  | 4,69  | 4,65  | 3           |
| 4           | 4,60  | 4,56  | 4,52  | 4,47  | 4,43  | 4,38  | 4,34  | 4,30  | 4,26  | 4,22  | 4           |
| 5           | 4,17  | 4,13  | 4,08  | 4,04  | 4,00  | 3,95  | 3,90  | 3,86  | 3,82  | 3,77  | 5           |
| 6           | 3,73  | 3,69  | 3,65  | 3,61  | 3,56  | 3,52  | 3,47  | 3,43  | 3,39  | 3,35  | 6           |
| 7           | 3,31  | 3,26  | 3,22  | 3,18  | 3,13  | 3,09  | 3,05  | 3,01  | 2,97  | 2,92  | 7           |
| 8           | 2,88  | 2,84  | 2,80  | 2,76  | 2,71  | 2,67  | 2,63  | 2,58  | 2,54  | 2,50  | 8           |
| 9           | 2,46  | 2,42  | 2,37  | 2,33  | 2,29  | 2,25  | 2,21  | 2,17  | 2,13  | 2,08  | 9           |
| 10          | 2,04  | 2,00  | 1,96  | 1,92  | 1,87  | 1,83  | 1,79  | 1,75  | 1,71  | 1,67  | 10          |
| 11          | 1,63  | 1,58  | 1,54  | 1,50  | 1,46  | 1,42  | 1,38  | 1,34  | 1,30  | 1,26  | 11          |
| 12          | 1,22  | 1,17  | 1,13  | 1,09  | 1,05  | 1,01  | 0,97  | 0,93  | 0,89  | 0,85  | 12          |
| 13          | 0,81  | 0,77  | 0,73  | 0,68  | 0,64  | 0,60  | 0,56  | 0,52  | 0,48  | 0,44  | 13          |
| 14          | 0,40  | 0,36  | 0,32  | 0,28  | 0,24  | 0,20  | 0,16  | 0,12  | 0,08  | 0,04  | 14          |
| 15          | 0     | -0,04 | -0,08 | -0,12 | -0,16 | -0,20 | -0,24 | -0,28 | -0,32 | -0,36 | 15          |
| 16          | -0,40 | -0,44 | -0,48 | -0,52 | -0,56 | -0,60 | -0,64 | -0,68 | -0,71 | -0,75 | 16          |
| 17          | -0,79 | -0,83 | -0,87 | -0,91 | -0,95 | -0,99 | -1,03 | -1,07 | -1,11 | -1,15 | 17          |
| 18          | -1,19 | -1,23 | -1,26 | -1,30 | -1,34 | -1,38 | -1,42 | -1,46 | -1,50 | -1,54 | 18          |
| 19          | -1,57 | -1,61 | -1,65 | -1,69 | -1,73 | -1,77 | -1,81 | -1,85 | -1,88 | -1,92 | 19          |
| 20          | -1,96 | -2,00 | -2,04 | -2,07 | -2,11 | -2,15 | -2,19 | -2,23 | -2,27 | -2,31 | 20          |
| 21          | -2,34 | -2,38 | -2,42 | -2,46 | -2,50 | -2,53 | -2,57 | -2,61 | -2,65 | -2,69 | 21          |
| 22          | -2,72 | -2,76 | -2,80 | -2,84 | -2,87 | -2,91 | -2,95 | -2,99 | -3,03 | -3,06 | 22          |
| 23          | -3,10 | -3,14 | -3,17 | -3,21 | -3,25 | -3,29 | -3,32 | -3,36 | -3,40 | -3,44 | 23          |
| 24          | -3,47 | -3,51 | -3,55 | -3,59 | -3,62 | -3,66 | -3,70 | -3,74 | -3,77 | -3,81 | 24          |
| 25          | -3,85 | -3,88 | -3,92 | -3,96 | -3,99 | -4,03 | -4,07 | -4,10 | -4,14 | -4,18 | 25          |
| 26          | -4,21 | -4,25 | -4,29 | -4,33 | -4,36 | -4,40 | -4,44 | -4,47 | -4,51 | -4,56 | 26          |
| 27          | -4,58 | -4,62 | -4,65 | -4,69 | -4,72 | -4,76 | -4,80 | -4,83 | -4,87 | -4,91 | 27          |
| 28          | -4,94 | -4,98 | -5,01 | -5,05 | -5,08 | -5,12 | -5,16 | -5,19 | -5,23 | -5,26 | 28          |
| 29          | -5,30 | -5,34 | -5,37 | -5,41 | -5,45 | -5,48 | -5,52 | -5,55 | -5,59 | -5,62 | 29          |
| 30          | -5,66 | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 30          |
|             | 0,0   | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   |             |



## ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Таблица поправок в процентах для приведения сопротивления  
алюминиевой обмотки, измеренного при температуре  $\vartheta$ ,  
к температуре  $+15^{\circ}\text{C}$

| $\vartheta$ | 0,0   | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | $\vartheta$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 0           | 6,12  | 6,08  | 6,04  | 5,99  | 5,95  | 5,91  | 5,86  | 5,82  | 5,78  | 5,73  | 0           |
| 1           | 5,69  | 5,65  | 5,60  | 5,56  | 5,52  | 5,48  | 5,43  | 5,39  | 5,35  | 5,31  | 1           |
| 2           | 5,26  | 5,22  | 5,18  | 5,14  | 5,09  | 5,05  | 5,01  | 4,97  | 4,92  | 4,88  | 2           |
| 3           | 4,84  | 4,80  | 4,75  | 4,71  | 4,67  | 4,63  | 4,59  | 4,54  | 4,50  | 4,46  | 3           |
| 4           | 4,42  | 4,38  | 4,33  | 4,29  | 4,25  | 4,21  | 4,17  | 4,13  | 4,08  | 4,04  | 4           |
| 5           | 4,00  | 3,96  | 3,92  | 3,88  | 3,83  | 3,79  | 3,75  | 3,71  | 3,67  | 3,63  | 5           |
| 6           | 3,59  | 3,54  | 3,50  | 3,46  | 3,42  | 3,38  | 3,34  | 3,30  | 3,26  | 3,22  | 6           |
| 7           | 3,17  | 3,13  | 3,09  | 3,05  | 3,01  | 2,97  | 2,93  | 2,89  | 2,85  | 2,81  | 7           |
| 8           | 2,77  | 2,73  | 2,69  | 2,65  | 2,61  | 2,56  | 2,52  | 2,48  | 2,44  | 2,40  | 8           |
| 9           | 2,36  | 2,32  | 2,28  | 2,24  | 2,20  | 2,16  | 2,12  | 2,08  | 2,04  | 2,00  | 9           |
| 10          | 1,96  | 1,92  | 1,88  | 1,84  | 1,80  | 1,76  | 1,72  | 1,68  | 1,64  | 1,60  | 10          |
| 11          | 1,56  | 1,52  | 1,48  | 1,44  | 1,40  | 1,37  | 1,33  | 1,29  | 1,25  | 1,21  | 11          |
| 12          | 1,17  | 1,13  | 1,09  | 1,05  | 1,01  | 0,97  | 0,93  | 0,89  | 0,85  | 0,81  | 12          |
| 13          | 0,78  | 0,74  | 0,70  | 0,65  | 0,62  | 0,58  | 0,54  | 0,50  | 0,46  | 0,43  | 13          |
| 14          | 0,39  | 0,35  | 0,31  | 0,27  | 0,23  | 0,19  | 0,15  | 0,12  | 0,08  | 0,04  | 14          |
| 15          | 0     | -0,04 | -0,08 | -0,12 | -0,15 | -0,19 | -0,23 | -0,27 | -0,31 | -0,34 | 15          |
| 16          | -0,38 | -0,42 | -0,46 | -0,50 | -0,54 | -0,57 | -0,61 | -0,65 | -0,69 | -0,73 | 16          |
| 17          | -0,76 | -0,80 | -0,84 | -0,88 | -0,91 | -0,95 | -0,99 | -1,03 | -1,07 | -1,10 | 17          |
| 18          | -1,14 | -1,18 | -1,22 | -1,25 | -1,29 | -1,33 | -1,37 | -1,40 | -1,44 | -1,48 | 18          |
| 19          | -1,52 | -1,55 | -1,59 | -1,63 | -1,66 | -1,70 | -1,74 | -1,78 | -1,81 | -1,85 | 19          |
| 20          | -1,89 | -1,92 | -1,96 | -2,00 | -2,03 | -2,07 | -2,11 | -2,14 | -2,18 | -2,22 | 20          |
| 21          | -2,26 | -2,29 | -2,33 | -2,37 | -2,40 | -2,44 | -2,48 | -2,51 | -2,55 | -2,59 | 21          |
| 22          | -2,62 | -2,66 | -2,69 | -2,73 | -2,77 | -2,80 | -2,84 | -2,88 | -2,91 | -2,95 | 22          |
| 23          | -2,99 | -3,02 | -3,06 | -3,09 | -3,13 | -3,17 | -3,20 | -3,24 | -3,27 | -3,31 | 23          |
| 24          | -3,35 | -3,38 | -3,42 | -3,45 | -3,49 | -3,52 | -3,56 | -3,60 | -3,63 | -3,67 | 24          |
| 25          | -3,70 | -3,74 | -3,78 | -3,81 | -3,85 | -3,88 | -3,92 | -3,95 | -3,99 | -4,02 | 25          |
| 26          | -4,06 | -4,09 | -4,13 | -4,17 | -4,20 | -4,24 | -4,27 | -4,31 | -4,34 | -4,38 | 26          |
| 27          | -4,41 | -4,45 | -4,48 | -4,52 | -4,55 | -4,59 | -4,62 | -4,66 | -4,69 | -4,73 | 27          |
| 28          | -4,76 | -4,80 | -4,83 | -4,87 | -4,90 | -4,94 | -4,97 | -5,01 | -5,04 | -5,08 | 28          |
| 29          | -5,11 | -5,14 | -5,18 | -5,21 | -5,25 | -5,28 | -5,32 | -5,35 | -5,39 | -5,42 | 29          |
| 30          | -5,46 | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 30          |
|             | 0,0   | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   |             |

## ПРИЛОЖЕНИЕ V

Таблица поправок в процентах для приведения электродвижущих сил, измеренных при частоте  $f$ , к частоте 50 гц

| $f$ | 0,0     | 0,1     | 0,2     | 0,3     | 0,4     | 0,5     | 0,6     | 0,7     | 0,8     | 0,9     | $f$ |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| 40  | 25,00   | 24,69   | 24,38   | 24,07   | 23,76   | 23,46   | 23,15   | 22,85   | 22,55   | 22,25   | 40  |
| 41  | 21,95   | 21,66   | 21,36   | 21,07   | 20,77   | 20,48   | 20,19   | 19,90   | 19,62   | 19,33   | 41  |
| 42  | 19,05   | 18,76   | 18,48   | 18,20   | 17,93   | 17,65   | 17,37   | 17,10   | 16,82   | 16,55   | 42  |
| 43  | 16,28   | 16,01   | 15,74   | 15,47   | 15,21   | 14,94   | 14,68   | 14,42   | 14,16   | 13,90   | 43  |
| 44  | 13,64   | 13,38   | 13,12   | 12,87   | 12,61   | 12,36   | 12,11   | 11,86   | 11,61   | 11,36   | 44  |
| 45  | 11,11   | 10,87   | 10,62   | 10,38   | 10,13   | 9,89    | 9,65    | 9,41    | 9,17    | 8,93    | 45  |
| 46  | 8,70    | 8,46    | 8,23    | 7,99    | 7,76    | 7,53    | 7,30    | 7,07    | 6,84    | 6,61    | 46  |
| 47  | 6,38    | 6,16    | 5,93    | 5,71    | 5,49    | 5,26    | 5,04    | 4,82    | 4,60    | 4,38    | 47  |
| 48  | 4,17    | 3,95    | 3,73    | 3,52    | 3,31    | 3,09    | 2,88    | 2,67    | 2,46    | 2,25    | 48  |
| 49  | 2,04    | 1,83    | 1,63    | 1,42    | 1,22    | 1,01    | 0,81    | 0,60    | 0,40    | 0,20    | 49  |
| 50  | 0       | — 0,20  | — 0,40  | — 0,60  | — 0,79  | — 0,99  | — 1,19  | — 1,38  | — 1,57  | — 1,77  | 50  |
| 51  | — 1,96  | — 2,15  | — 2,34  | — 2,53  | — 2,72  | — 2,91  | — 3,10  | — 3,29  | — 3,47  | — 3,66  | 51  |
| 52  | — 3,85  | — 4,03  | — 4,21  | — 4,40  | — 4,58  | — 4,76  | — 4,94  | — 5,12  | — 5,30  | — 5,48  | 52  |
| 53  | — 5,66  | — 5,84  | — 6,01  | — 6,19  | — 6,37  | — 6,54  | — 6,72  | — 6,89  | — 7,06  | — 7,24  | 53  |
| 54  | — 7,41  | — 7,58  | — 7,75  | — 7,92  | — 8,09  | — 8,26  | — 8,44  | — 8,59  | — 8,76  | — 8,92  | 54  |
| 55  | — 9,09  | — 9,26  | — 9,42  | — 9,58  | — 9,75  | — 9,91  | — 10,07 | — 10,23 | — 10,39 | — 10,55 | 55  |
| 56  | — 10,71 | — 10,87 | — 11,03 | — 11,19 | — 11,35 | — 11,50 | — 11,66 | — 11,82 | — 11,97 | — 12,13 | 56  |
| 57  | — 12,28 | — 12,43 | — 12,59 | — 12,74 | — 12,89 | — 13,04 | — 13,19 | — 13,34 | — 13,49 | — 13,64 | 57  |
| 58  | — 13,79 | — 13,94 | — 14,09 | — 14,24 | — 14,38 | — 14,53 | — 14,68 | — 14,82 | — 14,97 | — 15,11 | 58  |
| 59  | — 15,25 | — 15,40 | — 15,54 | — 15,68 | — 15,82 | — 15,97 | — 16,11 | — 16,25 | — 16,39 | — 16,53 | 59  |
| 60  | — 16,67 | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | —       | 60  |
|     | 0,0     | 0,1     | 0,2     | 0,3     | 0,4     | 0,5     | 0,6     | 0,7     | 0,8     | 0,9     |     |

## ПРИЛОЖЕНИЕ VI

Таблица значений  $\cos \varphi$  в зависимости от отношения показаний ваттметров  $\alpha_1 : \alpha_2$  в схеме измерения мощности трехфазного тока по способу двух ваттметров при симметричной нагрузке фазА.  $\alpha_1 : \alpha_2 > 0$ 

| $\alpha_1 : \alpha_2$ | 0,00   | 0,01   | 0,02   | 0,03   | 0,04   | 0,05   | 0,06   | 0,07   | 0,08   | 0,09   | $\alpha_1 : \alpha_2$ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| 0,0                   | 0,5000 | 0,5075 | 0,5151 | 0,5227 | 0,5303 | 0,5379 | 0,5456 | 0,5533 | 0,5610 | 0,5688 | 0,0                   |
| 0,1                   | 0,5766 | 0,5843 | 0,5921 | 0,5999 | 0,6078 | 0,6156 | 0,6234 | 0,6312 | 0,6390 | 0,6469 | 0,1                   |
| 0,2                   | 0,6546 | 0,6624 | 0,6702 | 0,6780 | 0,6857 | 0,6934 | 0,7010 | 0,7087 | 0,7163 | 0,7238 | 0,2                   |
| 0,3                   | 0,7313 | 0,7387 | 0,7461 | 0,7535 | 0,7608 | 0,7680 | 0,7751 | 0,7822 | 0,7892 | 0,7961 | 0,3                   |
| 0,4                   | 0,8030 | 0,8097 | 0,8164 | 0,8229 | 0,8294 | 0,8358 | 0,8420 | 0,8482 | 0,8542 | 0,8602 | 0,4                   |
| 0,5                   | 0,8660 | 0,8717 | 0,8773 | 0,8828 | 0,8882 | 0,8934 | 0,8985 | 0,9035 | 0,9083 | 0,9131 | 0,5                   |
| 0,6                   | 0,9177 | 0,9221 | 0,9265 | 0,9307 | 0,9347 | 0,9386 | 0,9424 | 0,9461 | 0,9496 | 0,9531 | 0,6                   |
| 0,7                   | 0,9563 | 0,9595 | 0,9625 | 0,9654 | 0,9681 | 0,9707 | 0,9732 | 0,9756 | 0,9779 | 0,9800 | 0,7                   |
| 0,8                   | 0,9820 | 0,9839 | 0,9856 | 0,9873 | 0,9888 | 0,9903 | 0,9916 | 0,9928 | 0,9939 | 0,9950 | 0,8                   |
| 0,9                   | 0,9959 | 0,9967 | 0,9974 | 0,9980 | 0,9986 | 0,9990 | 0,9994 | 0,9997 | 0,9998 | 1,0000 | 0,9                   |

Б.  $\alpha_1 : \alpha_2 < 0$ 

| $\alpha_1 : \alpha_2$ | -0,00  | -0,01  | -0,02  | -0,03  | -0,04  | -0,05  | -0,06  | -0,07  | -0,08  | -0,09  | $\alpha_1 : \alpha_2$ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| -0,0                  | 0,5000 | 0,4925 | 0,4851 | 0,4777 | 0,4703 | 0,4630 | 0,4557 | 0,4485 | 0,4413 | 0,4342 | -0,0                  |
| -0,1                  | 0,4271 | 0,4201 | 0,4131 | 0,4062 | 0,3993 | 0,3925 | 0,3857 | 0,3790 | 0,3724 | 0,3658 | -0,1                  |
| -0,2                  | 0,3592 | 0,3527 | 0,3463 | 0,3399 | 0,3336 | 0,3273 | 0,3211 | 0,3150 | 0,3089 | 0,3028 | -0,2                  |
| -0,3                  | 0,2969 | 0,2910 | 0,2851 | 0,2793 | 0,2735 | 0,2678 | 0,2622 | 0,2566 | 0,2511 | 0,2456 | -0,3                  |
| -0,4                  | 0,2402 | 0,2348 | 0,2295 | 0,2243 | 0,2191 | 0,2139 | 0,2088 | 0,2038 | 0,1988 | 0,1939 | -0,4                  |
| -0,5                  | 0,1890 | 0,1842 | 0,1794 | 0,1746 | 0,1699 | 0,1653 | 0,1607 | 0,1562 | 0,1517 | 0,1473 | -0,5                  |
| -0,6                  | 0,1429 | 0,1385 | 0,1342 | 0,1299 | 0,1257 | 0,1216 | 0,1174 | 0,1132 | 0,1093 | 0,1053 | -0,6                  |
| -0,7                  | 0,1013 | 0,0975 | 0,0936 | 0,0897 | 0,0860 | 0,0822 | 0,0785 | 0,0748 | 0,0711 | 0,0676 | -0,7                  |
| -0,8                  | 0,0640 | 0,0605 | 0,0570 | 0,0536 | 0,0501 | 0,0468 | 0,0434 | 0,0401 | 0,0368 | 0,0336 | -0,8                  |
| -0,9                  | 0,0304 | 0,0272 | 0,0240 | 0,0209 | 0,0178 | 0,0148 | 0,0118 | 0,0088 | 0,0058 | 0,0029 | -0,9                  |

Таблица значений  $\sin \varphi$  в зависимости от отношения показаний ваттметров  $\alpha_1 : \alpha_2$  в схеме измерения мощности трехфазного тока по способу двух ваттметров при симметричной нагрузке фазА.  $\alpha_1 : \alpha_2 > 0$ 

| $\alpha_1 : \alpha_2$ | 0,00   | 0,01   | 0,02   | 0,03   | 0,04   | 0,05   | 0,06   | 0,07   | 0,08   | 0,09   | $\alpha_1 : \alpha_2$ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| 0,0                   | 0,8660 | 0,8616 | 0,8572 | 0,8526 | 0,8478 | 0,8430 | 0,8380 | 0,8330 | 0,8278 | 0,8225 | 0,0                   |
| 0,1                   | 0,8171 | 0,8115 | 0,8058 | 0,8001 | 0,7941 | 0,7881 | 0,7819 | 0,7756 | 0,7692 | 0,7626 | 0,1                   |
| 0,2                   | 0,7559 | 0,7491 | 0,7422 | 0,7351 | 0,7279 | 0,7206 | 0,7131 | 0,7055 | 0,6978 | 0,6900 | 0,2                   |
| 0,3                   | 0,6821 | 0,6740 | 0,6658 | 0,6574 | 0,6490 | 0,6405 | 0,6318 | 0,6230 | 0,6141 | 0,6052 | 0,3                   |
| 0,4                   | 0,5960 | 0,5868 | 0,5775 | 0,5681 | 0,5587 | 0,5491 | 0,5394 | 0,5297 | 0,5199 | 0,5100 | 0,4                   |
| 0,5                   | 0,5000 | 0,4900 | 0,4799 | 0,4697 | 0,4595 | 0,4493 | 0,4380 | 0,4286 | 0,4182 | 0,4078 | 0,5                   |
| 0,6                   | 0,3974 | 0,3869 | 0,3764 | 0,3659 | 0,3554 | 0,3449 | 0,3344 | 0,3238 | 0,3133 | 0,3028 | 0,6                   |
| 0,7                   | 0,2924 | 0,2819 | 0,2714 | 0,2609 | 0,2506 | 0,2402 | 0,2299 | 0,2196 | 0,2094 | 0,1992 | 0,7                   |
| 0,8                   | 0,1890 | 0,1789 | 0,1689 | 0,1589 | 0,1490 | 0,1391 | 0,1293 | 0,1195 | 0,1098 | 0,1002 | 0,8                   |
| 0,9                   | 0,0907 | 0,0813 | 0,0720 | 0,0627 | 0,0535 | 0,0444 | 0,0354 | 0,0264 | 0,0175 | 0,0087 | 0,9                   |

Б.  $\alpha_1 : \alpha_2 < 0$ 

| $\alpha_1 : \alpha_2$ | -0,00  | -0,01  | -0,02  | -0,03  | -0,04  | -0,05  | -0,06  | -0,07  | -0,08  | -0,09  | $\alpha_1 : \alpha_2$ |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|
| -0,0                  | 0,8660 | 0,8703 | 0,8745 | 0,8785 | 0,8825 | 0,8864 | 0,8901 | 0,8938 | 0,8973 | 0,9008 | -0,0                  |
| -0,1                  | 0,9042 | 0,9075 | 0,9107 | 0,9138 | 0,9168 | 0,9197 | 0,9226 | 0,9254 | 0,9281 | 0,9307 | -0,1                  |
| -0,2                  | 0,9333 | 0,9357 | 0,9381 | 0,9405 | 0,9427 | 0,9449 | 0,9470 | 0,9491 | 0,9511 | 0,9530 | -0,2                  |
| -0,3                  | 0,9549 | 0,9567 | 0,9585 | 0,9602 | 0,9619 | 0,9635 | 0,9650 | 0,9665 | 0,9680 | 0,9694 | -0,3                  |
| -0,4                  | 0,9707 | 0,9720 | 0,9733 | 0,9745 | 0,9757 | 0,9769 | 0,9780 | 0,9790 | 0,9800 | 0,9810 | -0,4                  |
| -0,5                  | 0,9820 | 0,9829 | 0,9838 | 0,9846 | 0,9855 | 0,9862 | 0,9870 | 0,9877 | 0,9884 | 0,9891 | -0,5                  |
| -0,6                  | 0,9897 | 0,9904 | 0,9910 | 0,9915 | 0,9921 | 0,9926 | 0,9931 | 0,9936 | 0,9940 | 0,9945 | -0,6                  |
| -0,7                  | 0,9949 | 0,9952 | 0,9956 | 0,9960 | 0,9963 | 0,9966 | 0,9969 | 0,9972 | 0,9975 | 0,9977 | -0,7                  |
| -0,8                  | 0,9980 | 0,9982 | 0,9984 | 0,9986 | 0,9987 | 0,9989 | 0,9991 | 0,9992 | 0,9993 | 0,9994 | -0,8                  |
| -0,9                  | 0,9995 | 0,9996 | 0,9997 | 0,9998 | 0,9998 | 0,9999 | 0,9999 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 | -0,9                  |

## ПРИЛОЖЕНИЕ VIII

Таблица величины скольжения  $s$  в процентах в зависимости от продолжительности  $T$  [сек] отсчета 20 периодов тока ротора при частоте питания 50 гц

| $T$ | 0,0   | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | $T$ |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 4   | 10,00 | 9,76 | 9,52 | 9,30 | 9,09 | 8,89 | 8,70 | 8,51 | 8,33 | 8,16 | 4   |
| 5   | 8,00  | 7,84 | 7,69 | 7,55 | 7,41 | 7,27 | 7,14 | 7,02 | 6,90 | 6,78 | 5   |
| 6   | 6,67  | 6,56 | 6,45 | 6,35 | 6,25 | 6,15 | 6,06 | 5,97 | 5,88 | 5,80 | 6   |
| 7   | 5,71  | 5,63 | 5,56 | 5,48 | 5,41 | 5,33 | 5,26 | 5,19 | 5,13 | 5,06 | 7   |
| 8   | 5,00  | 4,94 | 4,88 | 4,82 | 4,76 | 4,71 | 4,65 | 4,60 | 4,55 | 4,49 | 8   |
| 9   | 4,44  | 4,40 | 4,35 | 4,30 | 4,26 | 4,21 | 4,17 | 4,12 | 4,08 | 4,04 | 9   |
| 10  | 4,00  | 3,96 | 3,92 | 3,88 | 3,85 | 3,81 | 3,77 | 3,74 | 3,70 | 3,67 | 10  |
| 11  | 3,64  | 3,60 | 3,57 | 3,54 | 3,51 | 3,48 | 3,45 | 3,42 | 3,39 | 3,36 | 11  |
| 12  | 3,33  | 3,31 | 3,28 | 3,25 | 3,23 | 3,20 | 3,17 | 3,15 | 3,13 | 3,10 | 12  |
| 13  | 3,08  | 3,05 | 3,03 | 3,01 | 2,99 | 2,96 | 2,94 | 2,92 | 2,90 | 2,88 | 13  |
| 14  | 2,86  | 2,84 | 2,82 | 2,80 | 2,78 | 2,76 | 2,74 | 2,72 | 2,70 | 2,68 | 14  |
| 15  | 2,67  | 2,65 | 2,63 | 2,61 | 2,60 | 2,58 | 2,56 | 2,55 | 2,53 | 2,52 | 15  |
| 16  | 2,50  | 2,48 | 2,47 | 2,45 | 2,44 | 2,42 | 2,41 | 2,40 | 2,38 | 2,37 | 16  |
| 17  | 2,35  | 2,34 | 2,33 | 2,31 | 2,30 | 2,29 | 2,27 | 2,26 | 2,25 | 2,23 | 17  |
| 18  | 2,22  | 2,21 | 2,20 | 2,19 | 2,17 | 2,16 | 2,15 | 2,14 | 2,13 | 2,12 | 18  |
| 19  | 2,11  | 2,09 | 2,08 | 2,07 | 2,06 | 2,05 | 2,04 | 2,03 | 2,02 | 2,01 | 19  |
| 20  | 2,00  | 1,99 | 1,98 | 1,97 | 1,96 | 1,95 | 1,94 | 1,93 | 1,92 | 1,91 | 20  |
| 21  | 1,90  | 1,90 | 1,89 | 1,88 | 1,87 | 1,86 | 1,85 | 1,84 | 1,83 | 1,83 | 21  |
| 22  | 1,82  | 1,81 | 1,80 | 1,79 | 1,79 | 1,78 | 1,77 | 1,76 | 1,75 | 1,75 | 22  |
| 23  | 1,74  | 1,73 | 1,72 | 1,72 | 1,71 | 1,70 | 1,69 | 1,69 | 1,68 | 1,67 | 23  |
| 24  | 1,67  | 1,66 | 1,65 | 1,65 | 1,64 | 1,63 | 1,63 | 1,62 | 1,61 | 1,61 | 24  |
| 25  | 1,60  | 1,59 | 1,59 | 1,58 | 1,57 | 1,57 | 1,56 | 1,56 | 1,55 | 1,54 | 25  |
| 26  | 1,54  | 1,53 | 1,53 | 1,52 | 1,52 | 1,51 | 1,50 | 1,50 | 1,49 | 1,49 | 26  |
| 27  | 1,48  | 1,48 | 1,47 | 1,47 | 1,46 | 1,45 | 1,45 | 1,44 | 1,44 | 1,43 | 27  |
| 28  | 1,43  | 1,42 | 1,42 | 1,41 | 1,41 | 1,40 | 1,40 | 1,39 | 1,39 | 1,38 | 28  |
| 29  | 1,38  | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,36 | 1,36 | 1,35 | 1,35 | 1,34 | 1,34 | 29  |
| 30  | 1,33  | 1,33 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,31 | 1,31 | 1,30 | 1,30 | 1,29 | 30  |
| 31  | 1,29  | 1,29 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,26 | 1,25 | 31  |
| 32  | 1,25  | 1,25 | 1,24 | 1,24 | 1,23 | 1,23 | 1,23 | 1,22 | 1,22 | 1,22 | 32  |
| 33  | 1,21  | 1,21 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,18 | 1,18 | 33  |
| 34  | 1,18  | 1,17 | 1,17 | 1,17 | 1,16 | 1,16 | 1,16 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 34  |
| 35  | 1,14  | 1,14 | 1,14 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,11 | 35  |
| 36  | 1,11  | 1,11 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 36  |
| 37  | 1,08  | 1,08 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 37  |
| 38  | 1,05  | 1,05 | 1,05 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 38  |
| 39  | 1,03  | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,00 | 39  |

Цена 17 р. 50 к.

7843

Д1  
15341

Экземпляр  
числ. 3324